



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

Comparación entre los tiempos de residencia calculados por métodos eulerianos y lagrangianos en el estuario mesomareal del Nervión (Puerto de Bilbao)

Autor/a

GERMÁN CLAVERO JORNET

Tutor/a

MANUEL ESPINO INFANTES / MANEL GRIFOLL I COLLS (cotutor)

Departament

Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental (DIHMA)

Intensificació

INGENIERÍA MARÍTIMA

Data

16/02/11

Mis agradecimientos

A mi tutor y cotutor de tesina, Dr. Manuel Espino Infantes y Manel Grifoll i Colls, por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica

A mi amigo Marc Cano, por alentarme cuando más lo necesito

A mis padres y hermana, por aguantarme día tras día

TITULO: Comparación entre los tiempos de residencia calculados por métodos eulerianos y lagrangianos en el estuario mesomareal del Nervión (Puerto de Bilbao)

AUTOR: GERMÁN CLAVERO JORNET

TUTOR: MANUEL ESPINO INFANTES

COTUTOR: MANEL GRIFOLL I COLLS

RESUMEN:

Este estudio tiene por objetivo ahondar en los métodos de cálculo empleados durante lo que hemos definido como *post-proceso* de modelos numéricos hidrodinámicos, concretamente para la obtención del tiempo de residencia y sus aplicaciones. Se contrastarán los tiempos de residencia obtenidos a raíz de cálculos basados en métodos eulerianos y lagrangianos en el estuario mesomareal del Nervión (Puerto de Bilbao) para realizar a posteriori un estudio comparativo entre ellos. Para ello, se ha utilizado el campo de corrientes del Puerto de Bilbao obtenido con el modelo de simulación ROMS.

Los modelos numéricos son métodos en alza dentro del campo de la ingeniería y en particular en la ingeniería marítima. Recientemente, numerosos estudios sobre el tiempo de residencia se han basado en éstos. Es el caso de Cucco et al. (2009), el cual empleó un modelo numérico bidimensional para los cálculos del tiempo de residencia en la laguna de Venecia en los que se tenía en cuenta el “*tidal forcing*”. De igual forma, asumió simplificaciones como ignorar el efecto del viento o la componente difusiva del transporte para el cálculo tanto lagrangiano como euleriano de dicho tiempo de residencia. En este estudio se ha implementado un modelo numérico tridimensional en el que se han incorporado tanto los forzamientos derivados del viento como de la marea.

Para el cálculo lagrangiano de las partículas se ha prescindido de los fenómenos difusivos del transporte debido al elevado coste computacional que ello acarrearía. Por el contrario, el cálculo euleriano de las trazas ha incluido tanto la componente advectiva como la difusiva del transporte.

El estudio comparativo se aborda a tres niveles con sus respectivas metodologías:

- *Tiempos de residencia eulerianos (TrE) y tiempos de residencia lagrangianos (TrL).* Se realiza un análisis cualitativo por separado de los tiempos de residencia obtenidos mediante métodos eulerianos y lagrangianos.
- *Influencia en la obtención del tiempo de residencia del estado inicial de la modelización para las cuatro fases de marea: vaciante, bajamar, llenante y pleamar.* Este análisis se ha llevado a cabo utilizando el coeficiente de variabilidad, cociente entre la desviación estándar y el tiempo de residencia medio de los 4 escenarios asociados al punto de estudio.
- *Valores de tiempo de residencia en superficie y fondo.* Se ha analizado la distribución espacial de las diferencias de tiempos de residencia en los dos niveles de profundidad.

TITLE: Comparación entre los tiempos de residencia calculados por métodos eulerianos y lagrangianos en el estuario mesomareal del Nervión (Puerto de Bilbao)

AUTHOR: GERMÁN CLAVERO JORNET

TUTOR: MANUEL ESPINO INFANTES

COTUTOR: MANEL GRIFOLL I COLLS

EXTRACT

In this work, the water time residence has been computed by means of both a eulerian and a lagrangian approach. The flushing features of Bilbao Harbour, at the meso - tidal estuary of Nervión (Basque Country, Spain) have been incorporated. To accomplish that, a numerical simulation has been carried out using the Regional Ocean Modelling System (ROMS). Following this, a comparative study has been taken.

The improvisation of numerical methods in the engineering field, particularly in maritime engineering, is a fact. A wide range of studies have been carried out using them. This is the case of Cucco et al. (2009), which used a 2D hydrodynamic model of the Venice lagoon to reproduce the tidal forcing. They neglected the wind effect and the diffusive transport processes. In this work, a 3D model has been used taking into account tidal and wind forcing instead.

Lagrangian computation has been carried out neglecting the diffusive transport processes because of the high computational cost needed. On the other hand, eulerian tracer computation has incorporated advective but also diffusive dynamics.

The work has been carried in 3 levels of study:

- *Eulerian residence time (TrE) and lagrangian residence time (TrL).* A qualitative study takes place separately of both eulerian and lagrangian residence times.
- *Influence of the tidal variability in the moment of the particles released: flood, high, ebb and low tide.* The variability coefficient has been computed, the quotient between standard deviation and average residence time of the 4 scenarios at the same study point.
- *Residence time in the surface and the bottom of the water mass.* The spatial distribution of the time differences between the two depth layers has been analyzed.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MODELOS NUMÉRICOS	1
1.2	ESTUDIOS DE CAMPO VS. MODELOS NUMÉRICOS	2
2	OBJETIVO	3
3	DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	3
3.1	ENTORNO: EL PUERTO DE BILBAO	3
3.2	CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DEL PUERTO	4
4	METODOLOGÍA	5
4.1	ESCALAS DE TEMPO DE TRANSPORTE. Terminología	5
4.2	ROMS (Regional Ocean Modelling System)	6
4.2.1	Configuración empleada	6
4.2.2	Forzamientos	7
4.3	ECUACIÓN DEL TRANSPORTE	9
4.4	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO	11
4.4.1	Métodos eulerianos	12
4.4.2	Métodos lagrangianos	14
4.5	COEFICIENTE DE VARIABILIDAD (Cv)	16
4.6	ZONIFICACIÓN	17
5	RESULTADOS	19
5.1	TIEMPOS DE RESIDENCIA EULERIANOS	19
5.1.1	FONDO	19
5.1.2	SUPERFICIE	21
5.2	TIEMPOS DE RESIDENCIA LAGRANGIANOS	24
5.2.1	FONDO	24
5.2.2	SUPERFICIE	26
5.3	COEFICIENTE DE VARIABILIDAD. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	29
5.3.1	Cv - TIEMPOS DE RESIDENCIA EULERIANOS	29
5.3.2	Cv - TIEMPOS DE RESIDENCIA LAGRANGIANOS	30
5.4	DIFERENCIAS FONDO – SUPERFICIE	32
5.4.1	MÉTODO EULERIANO	32
5.4.2	MÉTODO LAGRANGIANO	34

6	DISCUSIÓN.....	37
6.1	DIFERENCIAS ENTRE TrE y TrL	37
6.2	INFLUENCIA DEL ESTADO INICIAL DE LA COMPUTACIÓN	39
6.3	DIFERENCIAS ENTRE FONDO Y SUPERFICIE.....	41
6.3.1	Cálculo euleriano.....	41
6.3.2	Cálculo lagrangiano	43
7	CONCLUSIONES	45
8	REFERENCIAS.....	46
8.1	BIBLIOGRAFÍA.....	46
8.2	WEBGRAFÍA.....	48

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MODELOS NUMÉRICOS

El famoso matemático *John von Neumann* escribió:

“Las ciencias no pretender explicar, a duras penas tratan de interpretar, suelen crear modelos. Se entiende por modelo una construcción matemática que, juntamente con la adición de algunas interpretaciones verbales, describe un fenómeno observado. La justificación de estas construcciones matemáticas es, simplemente, que se espera que den resultado”

Von Neumann tenía clara la definición de “modelo”. Sin embargo, pareció no predecir que la implementación de modelos matemáticos en potentes ordenadores daría como resultado una cantidad tan elevada de números reales que el verdadero reto residía en el pos-proceso y en la posterior “interpretación verbal”.

El tiempo de residencia es, juntamente con la concentración de varios componentes químicos del agua, uno de los factores más importantes en el estudio de la calidad del agua de embalses, lagos o puertos. La investigación mediante modelos numéricos se ha intensificado a medida que la gestión medioambiental se ha implantado en todos los sectores. Dichos modelos tienen por objetivo responder a una de las preguntas más relevantes en el campo de la ingeniería del agua: “¿Cuál es el rol del tiempo de residencia en el estudio de la calidad del agua? ¿Es posible manipular el tiempo de residencia con el objetivo de mejorar esta última?

Estudios de campo ([Jørgensen, 2001](#); [England and Maier-Reimer, 2001](#); [Delhez et al., 2004](#)) han revelado la gran influencia que el tiempo de residencia tiene en la calidad del agua de lagos y embalses. Dichas conclusiones serían también extrapolables a un puerto. Por lo que concierne a la segunda pregunta, la respuesta es “sí”. Desvíos totales o parciales de las aguas residuales entrantes en áreas de estudio, juntamente con el tratamiento de éstas mediante precipitación, han resultado en una disminución del tiempo de residencia y en una disminución de la eutrofización, dando lugar a una mejora considerable de la calidad del agua. De forma contraria, aumentar el flujo saliente y por tanto, disminuir el tiempo de renovación en los meses en que el fitoplancton y el desove crecen en mayor medida, también permite obtener mejoras en términos de eutrofización. Resulta evidente pues, la importancia del estudio del tiempo de renovación y consecuentemente, de las técnicas requeridas para su cálculo.

Desde un punto de vista numérico, para entender el reto al que nos enfrentamos, considere un modelo numérico de una región marina basado en una retícula de 100×100 puntos en el plano horizontal y 20 puntos en el vertical. Obtenemos una retícula de 2×10^5 puntos, lejos de ser algo excepcional. Ahora, asuma 20 variables a computar en cada punto (ej. componentes de la velocidad, temperatura, salinidad, turbulencia, variables ecológicas, etc.). Consecuentemente, 4×10^6 variables discretas se actualizarán en cada paso de tiempo. Considerando un paso de 2 minutos y una simulación de un año de duración, dicho modelo numérico produciría 10^{12} números reales. Parece evidente el uso de estrategias específicas de post-proceso que nos permitan presentar los resultados en un formato susceptible de análisis.

Aunque la computación de gráficos, ampliamente usada, parece el recurso adecuado, ésta última no es la solución final al problema. Una pantalla estándar de ordenador presenta una resolución aproximada de 10^6 píxeles. Asumiendo que cada píxel tiene asociado un número real, sería necesario mostrar 10^6 imágenes que ocuparían la pantalla al completo para “visualizar” los resultados obtenidos por el modelo. Dicha solución no parece factible. A lo sumo, uno podría mostrar en pantalla y analizar 10^2 imágenes o secuencias de éstas, lo que supone un 0.01 % de los datos obtenidos mediante la simulación numérica. Podría argumentarse en dicho caso que los resultados mostrados han sido cuidadosamente seleccionados como para obtener interpretaciones válidas, afirmación dudosa dado que se habría prescindido del 99.99 % de los resultados del modelo.

Son claramente necesarios métodos de post-proceso que prescindan en la menor medida posible de los datos obtenidos. Es el caso de los métodos estadísticos, capaces de reducir relevantemente la cantidad de información que puede procesar el cerebro humano. Igualmente válidas son las aproximaciones basadas en trazadores reales o numéricos (England and Maier-Reimer, 2001; Delhez et al., 2004) y tiempos de escala asociados (ej. edad, tiempo de residencia, tiempo en tránsito, etc.). Se trata de técnicas holísticas que sacan el máximo provecho de, sino de todos, casi todos los resultados. Éstas últimas suministran también una visión cuantitativa de la dinámica existente y los ratios de funcionamiento del sistema (Delhez et al., 2004). Dichos diagnósticos son el primer paso para interpretar los resultados de un modelo.

1.2 ESTUDIOS DE CAMPO VS. MODELOS NUMÉRICOS

La capacidad de renovación del agua de un embalse o en nuestro caso, de un puerto, puede calcularse de dos formas distintas:

a) *Mediante experimentos de campo:* Se vale de éstos para observar la dispersión de un trazador conservativo o para medir la salinidad con el objetivo de calcular el contenido de agua fresca y el tiempo necesario para reemplazarla (Asselin and Spaulding, 1993) o el tiempo para renovar el agua presente en origen en el dominio en cuestión (Miller and McPherson, 1991).

b) *Mediante modelos numéricos:* Se trata de modelos que simulan el flujo y el transporte existente en el área de estudio. Debe tenerse en cuenta que cuanto mayor sea el número de procesos a resolver, más difícil será encontrar un modelo apropiado, particularmente cuando los sistemas varíen ampliamente en tamaño, profundidad, estratificación, flujo de entrada, etc. Los coeficientes de difusión turbulenta y dispersión se estiman a partir de datos experimentales, así como los coeficientes de fricción con el fondo o el forzamiento mareal de tablas y páginas web. Las bases GIS (*Geographic Information System*) proveerán la batimetría digitalizada y las fronteras del dominio de cada sistema, a partir de las cuales se generarán mallas 3D para la predicción de la circulación y el transporte.

Los modelos numéricos son métodos en alza dentro del campo de la ingeniería y en particular en la ingeniería marítima. Recientemente, numerosos estudios sobre el tiempo de residencia se han basado en éstos. Es el caso de Cucco et al. (2009), el cual empleó un modelo numérico bidimensional para los cálculos del tiempo de residencia en la laguna de Venecia en los que se tenía en cuenta el “tidal forcing”. De igual forma, asumió simplificaciones como

ignorar el efecto del viento o la componente difusiva del transporte para el cálculo tanto lagrangiano como euleriano de dicho tiempo de residencia.

2 OBJETIVO

Este estudio tiene por objetivo ahondar en los métodos de cálculo empleados durante lo que hemos definido previamente como *post-proceso* de modelos numéricos hidrodinámicos, concretamente para la obtención del tiempo de residencia y sus aplicaciones. Se contrastarán los tiempos de residencia obtenidos a raíz de cálculos basados en métodos eulerianos y lagrangianos en el estuario mesomareal del Nervión (Puerto de Bilbao) para realizar a posteriori un estudio comparativo entre ellos.

Para ello el estudio comparativo se realizará a 3 niveles:

- Tiempos de residencia eulerianos (TrE) y tiempos de residencia lagrangianos (TrL)
- Influencia en la obtención del tiempo de residencia del estado inicial de la modelización para las cuatro fases de marea: vaciante, bajamar, llenante y pleamar.
- Valores de tiempo de residencia en superficie y fondo.

3 DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

3.1 ENTORNO: EL PUERTO DE BILBAO

El puerto de Bilbao se emplaza en el estuario del Nervión (País Vasco, Bahía de Vizcaya). La ciudad de Bilbao (354.145 habitantes, un millón incluyendo el área metropolitana), se encuentra a pocos kilómetros del puerto y es la ciudad más importante de la región en términos de negocio y cultura. Alrededor del puerto de Bilbao (Figura 3.1) se ha desarrollado una fuerte actividad industrial, centrada sobre todo en el transporte marino de metal y fuel (18 millones de toneladas en 2005, www.bilbaoport.es), así como el de



Figura 3.1: Puerto de Bilbao (<http://cybereuskadi.com>)

contenedores (0.5 millones TEUs en 2005. TEU: capacidad de carga de un contenedor normalizado de 20 pies). El área comercial del puerto se concentra en la parte oeste del estuario, juntamente con una elevada concentración de terminales de tráfico, almacenes e industria. Al este, una área residencial (Getxo) y un gran número de playas públicas. El rompeolas externo (Punta Lucero) protege el puerto del energético oleaje proveniente del noroeste y condiciona la dinámica marina en el interior de éste. Ver Figura 3.2.

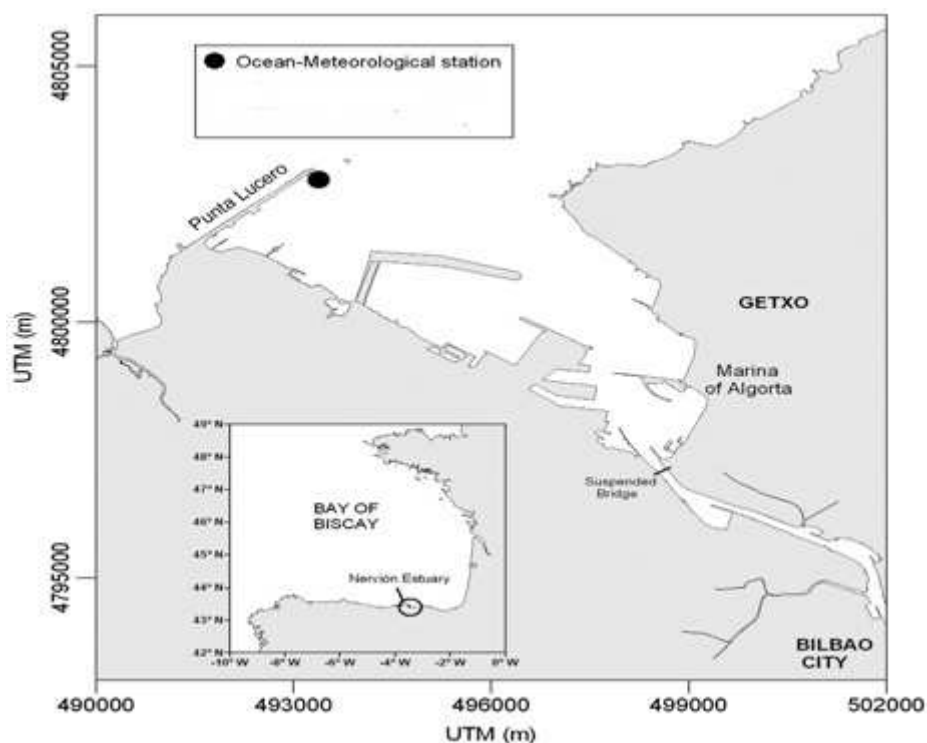


Figura 3.2: Mapa del estuario del Nervión y de su localización en la Bahía de Vizcaya. En el lado oeste, el dique y el rompeolas externo (Punta Lucero). El círculo indica el emplazamiento de la estación oceano-meteorológica (adaptado de Grifoll et al, 2009).

3.2 CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DEL PUERTO

El estuario del río Nervión tiene una superficie aproximada de 20 km² y una profundidad media de 30 m. Además, el río Nervión es el más caudaloso de la región, con un caudal principal de 36 m³s⁻¹. El prisma de marea (diferencia en volumen de agua entre la pleamar y la bajamar dentro del estuario) es de 60·10⁶ m³ (Valencia et al., 2004). Teóricamente, el caudal principal del río Nervión tardaría entre 1 o 2 meses en llenar el volumen principal del estuario. Es sabido que, estuarios como el del río Nervión, con elevados tiempos de residencia, son más susceptibles de sufrir acumulaciones de biomasa (fitoplancton) y eutrofización (Valencia et al., 2004).

El estudio de la marea es básico para conocer los mecanismos hidrológicos existentes. En el estuario, la marea es de carácter *semidiurno*. Entra en la bahía proveniente del oeste, se expande a lo largo del este aumentando en altura, y finalmente progresa hacia el norte a lo largo de la costa este (González et al., 2004). El rango de marea (en altura) dentro del puerto es de 3.5 m. Las componentes de la marea principal de las variaciones en el nivel del mar obtenidas en la estación oceano-meteorológica (Figura 3.2) se han recopilado en la Tabla 3.1. Puede apreciarse como el componente armónico principal es de clase M2 y que dentro del estuario de características mesomareal las corrientes de marea son dominantes sobre otros agentes climáticos, marinos o fluviales (González et al. (2004)).

Componentes de marea	Amplitud	Fase (°)
M2	1.3319	95.05
S2	0.5723	121.96

N2	0.2464	85.04
MM	0.1727	296.92
01	0.0755	323.19
K1	0.0522	78.39
M4	0.0242	330.09
Q1	0.0180	300.12
ETA2	0.0130	137.72

Tabla 3.1: Componentes de marea obtenidos con medidores de presión incorporados en las estaciones océano - meteorológicas (ver Figura 3.2)

Un estudio previo de la dinámica meteorológica de la costa vasca determinó que los vientos soplan predominantemente de noroeste a sur. Según [Usabiaga et al. \(2004\)](#), los vientos del sur son menos frecuentes entre marzo y agosto que de julio a diciembre. En otoño e invierno, son los vientos del noroeste los que son más débiles que en primavera y verano. El porcentaje en calma es del 27 %.

El régimen del viento también tiene un rol importante en los patrones de circulación existentes. La circulación del estuario mejora bajo la influencia de los vientos del sur, los cuales favorecen el afloramiento de las aguas profundas. Éstas, más saladas y frías, penetran en el estuario debido a la marea y elevan la termoclina, lo que supone un aumento de la estratificación. De forma opuesta, los vientos del norte disminuyen la circulación del estuario, favorecen el hundimiento de las aguas superficiales y reducen la estratificación a lo largo de la columna de agua. Como resultado de este proceso, la columna de agua suele estar ocupada prácticamente en su totalidad por aguas cálidas en agosto y septiembre ([Valencia et al., 2004](#)). La contribución del oleaje en las corrientes puede considerarse nula dado que no se da la rotura de olas ([Svendsen, 1984](#)) en el interior del puerto, y el oleaje es de poca importancia una vez se ha difractado en la bocana del puerto.

4 METODOLOGÍA

4.1 ESCALAS DE TEMPO DE TRANSPORTE. Terminología

En dinámica de fluidos, los procesos de transporte pueden describirse mediante lo que denominamos “*escalas de tiempo de transporte*”. Éstas giran alrededor del concepto de “renovación del agua”. Existen múltiples nombres para aludir a éstas: tiempo de lavado, tiempo de residencia, tiempo de residencia local, “tiempo de reemplazo de agua dulce”, tiempo de renovación, tiempo en tránsito, edad... ([Bolin and Rodhe, 1973](#); [Takeoka, 1984](#); [Zimmerman, 1988](#); [Monsen et al., 2002](#); [Abdelrhman, 2002](#)) Tiene sentido que, como ya señaló [Takekoka \(1984\)](#), del mismo modo que existen diferentes fenómenos asociados al transporte en las aguas costeras también existan diferentes escalas de transporte allí.

La definición de estos conceptos puede, sin embargo, no ser única y resultar ambigua. Por ello, conviene simplificar y establecer una terminología que no confunda al lector.

En este trabajo, estableceremos dos tipos de tiempos de residencia cuyas aproximaciones difieren:

a) **Tiempo de residencia euleriano (TrE)**: Se trata del tiempo requerido para que la masa total de una traza conservativa originalmente disuelta en todo el dominio, se reduzca en un factor 1/e. Considerando que el TrE es una propiedad específica de un volumen de control fijo en el espacio del dominio en cuestión, se trata de una aproximación euleriana de la escala de tiempo de transporte.

b) **Tiempo de residencia lagrangiano (TrL)**: Corresponde al tiempo que una partícula de agua emplearía hasta abandonar el dominio desde su posición de estudio inicial. Teniendo en cuenta que el TrL es una propiedad sujeta a los diferentes puntos del espacio por los que nuestro volumen de control discurrirá con el flujo, se trata de una aproximación lagrangiana.

De ahora en adelante nos valdremos de esta terminología y consideraremos los términos “*tiempo de residencia*” y “*tiempo de renovación*” sinónimos entre sí.

4.2 ROMS (Regional Ocean Modelling System)

Como su nombre indica, ROMS es un sistema para el modelaje oceánico regional, una evolución del modelo en coordenadas S de la Universidad de Rutgers (SCRUM). Dicho modelo se ha implementado recientemente de forma que incluye esquemas de advección de orden elevado, algoritmos para el cálculo de los gradientes de presión, módulos biológicos, condiciones de contorno de radiación y un buen procesamiento de datos.



4.1: Logo del ROMS

El modelo oceánico ROMS presenta la ventaja de haber sido desarrollado desde un principio como un modelo regional, siendo utilizado en estudios oceanográficos a distintas escalas espaciales y temporales, y ha mostrado su utilidad para la simulación climática. Una característica muy interesante de este modelo es su facilidad para el anidado, la cual hace posible realizar estudios de impacto climáticos regionales y locales con el mismo modelo.

Su estructura permite elegir en cada aplicación entre los distintos procesos que el modelo es capaz de representar más adecuadamente, consiguiéndose así una gran flexibilidad y una mayor adaptabilidad a la zona de estudio. Además, su estructura modular hace relativamente simple añadirle otros submodelos: biogeoquímico, de sedimentación, de propagaciones de olas o de hielo marino.

Actualmente, ROMS no designa un modelo único y existen un gran número de instituciones que han desarrollado varias versiones de este abiertamente. En este estudio el código de la versión ROMS empleado se ha descargado del IRD (Institut de recherche pour le développement, www.brest.ird.fr).

4.2.1 Configuración empleada

En la implementación del modelo ROMS en el Puerto de Bilbao, el dominio numérico del modelo se extiende desde la parte más baja del Estuario del Nervión hasta la frontera con el mar abierto (aguas adentro del rompeolas “Punta Lucero”). La resolución horizontal media presenta un valor de 32 metros (176 x 218 puntos) mientras que, verticalmente, la columna de

agua se ha dividido en 5 niveles coordinados sigma. La elección de dicha resolución se realizó con el objetivo de proveer una solución precisa concorde con la forma del puerto. Consecuentemente, el paso de tiempo barotrópico (ecuaciones hidrodinámicas 2D) es de 4 segundos, mientras que el paso de tiempo baroclínico es cuatro veces mayor para satisfacer la condición de estabilidad de Courant.

La batimetría implementada en el modelo se obtuvo mediante el *Sistema Sonar Seabat Multibeam* por AZTI (Grifoll et al, 2009), lo que nos ha permitido obtener una batimetría realista de notable precisión.

Por otro lado, la viscosidad turbulenta vertical (de igual forma que el coeficiente de difusión para la temperatura y salinidad potenciales) se ha computado para las capas de superficie y fondo mediante una parametrización K-Perfil (Large et al., 1994). Esta relaciona la variación de la difusividad de los remolinos con la distancia a la superficie.

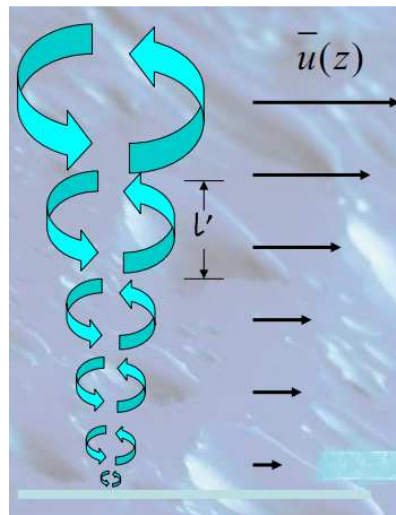


Figura 4.2: Ilustración de la hipótesis adoptada por la parametrización K-Perfil. Relaciona la variación de la difusividad de los remolinos con la distancia a la superficie

La viscosidad turbulenta horizontal se ha determinado mediante el modelo de cierre turbulento de Smagorinsky (1963). Una descripción numérica más concisa fue descrita en detalle por Schepetkin and McWilliams (2005). El código de la versión ROMS empleado se ha descargado del IRD (Institut de recherche pour le développement).

4.2.2 Forzamientos

4.2.2.1 Viento

Las condiciones de viento impuestas se han obtenido de una estación meteorológica (ver Figura 3.2). A continuación se muestran los valores de intensidad y dirección con la que se ha forzado el modelo implementado (ver Figura 4.3). Como se aprecia con claridad en la Figura 4.4, se observa la existencia de una dirección predominante NO (los vientos soplan predominantemente de noroeste a sur) cuyo sentido alterna cada 12 horas. Dicho comportamiento cíclico indica la presencia de una brisa marina:

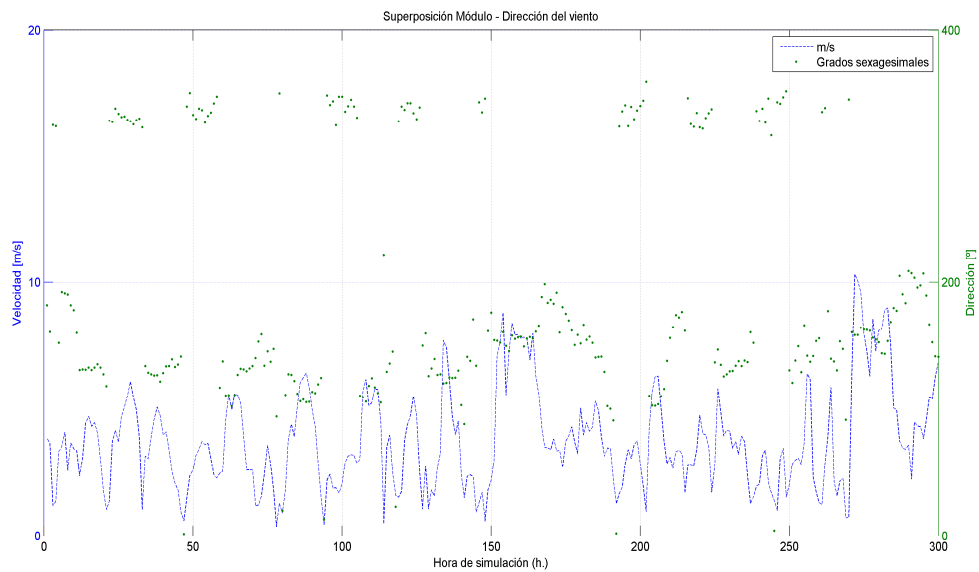


Figura 4.3: Gráfica Intensidad - Dirección – Hora de simulación del viento. Eje de abscisas limitado entre las 0 y 300 horas de simulación ROMS.

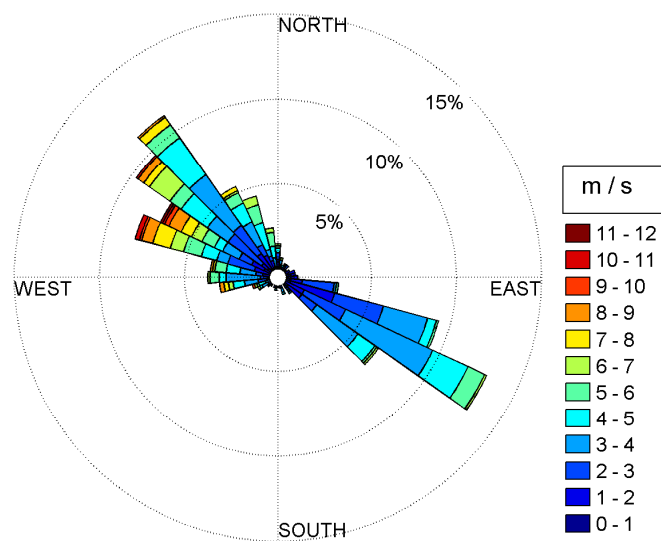


Figura 4.4: Rosa de vientos. Frecuencias.

4.2.2.2 Marea

Además del viento, también se ha forzado el modelo con la marea en los contornos. Una vez se han obtenido los resultados del modelo ROMS (ver [anejo 2](#)), para el inicio de la modelización de la evolución de las trazas eulerianas y las partículas lagrangianas, se han considerado cuatro condiciones de forzamiento mareal distintas, las cuatro fases de marea:

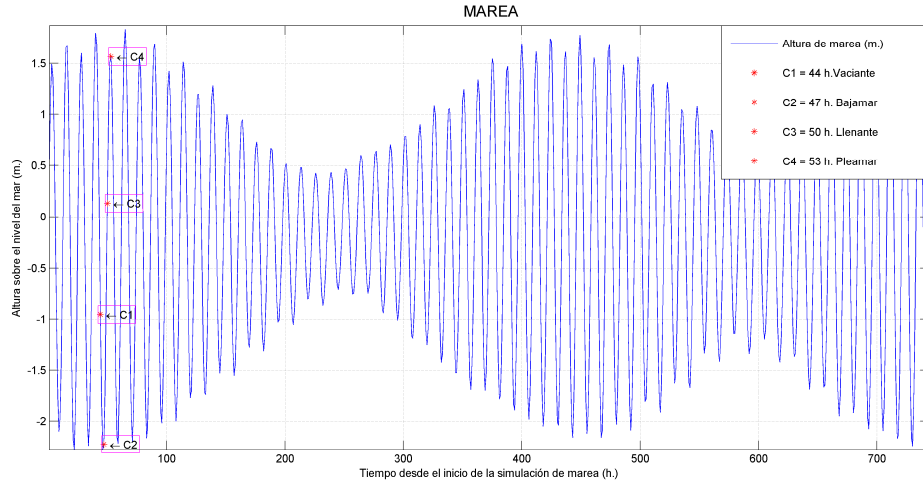


Figura 4.5: Altura de marea calculada con ROMS [0 – 744 h.]. Se indican las 4 fases de marea y la correlación con la hora de simulación para las que se han iniciado la computación de los tiempos de residencia.

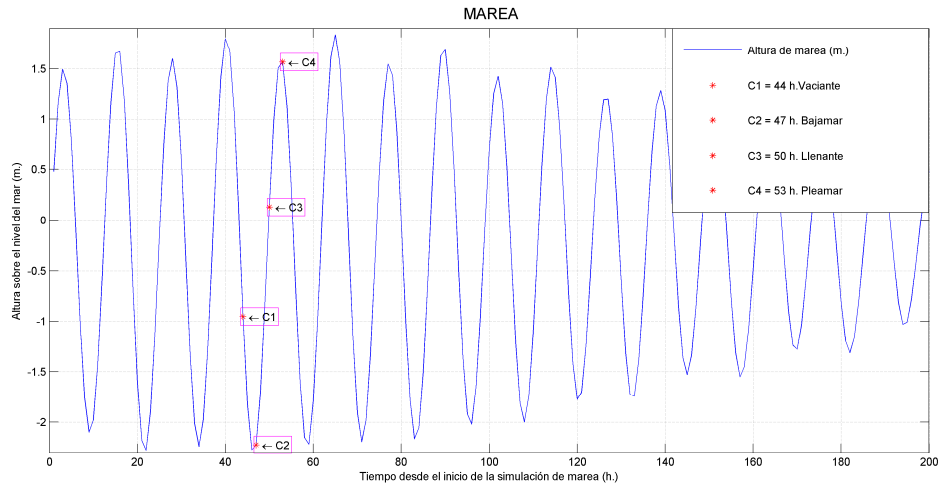


Figura 4.6: Altura de marea calculada con ROMS [0 – 200 h.]. Se indican también las 4 fases de marea y la correlación con la hora de simulación para las que se han iniciado la computación de los tiempos de residencia.

En las Figura 4.5 y Figura 4.6 se muestra la correspondencia entre la hora de simulación de marea y las cuatro fases de marea: vaciante, bajamar, llenante y pleamar. Se identifica con claridad el periodo de marea viva. Por otro lado, el período de $12\text{ h.} \approx 12\text{ h. } 25\text{ min.}$ responde a las condiciones de marea semidiurna.

4.3 ECUACIÓN DEL TRANSPORTE

Para el cálculo de los tiempos de residencia a partir de los resultados del ROMS, se resuelve la ecuación del transporte.

¿En qué consiste dicha ecuación?

Considérese un elemento cúbico $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ en un punto del espacio fijo en el que existe un flujo con velocidad (u, v, w) . La cantidad de contaminante entrante en ΔV en cada dirección durante un intervalo de tiempo Δt será:

$$\Delta m_{yz} = - \left[\frac{\partial}{\partial x}(uC) + \frac{\partial}{\partial x} \left(-D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad eq. [1]$$

$$\Delta m_{xz} = - \left[\frac{\partial}{\partial y}(vC) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad eq. [2]$$

$$\Delta m_{xy} = - \left[\frac{\partial}{\partial z}(wC) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \quad eq. [3]$$

donde $D = (D_x, D_y, D_z)$ es el vector de difusión molecular, C es la concentración de sustancia y m_{ij} representa la masa que atraviesa la superficie definida por los ejes $i - j$.

Consecuentemente, la variación de la masa dentro del volumen de control ΔV es:

$$\frac{\Delta m}{\Delta V \Delta t} = \left[\frac{\partial}{\partial x}(uC) + \frac{\partial}{\partial y}(vC) + \frac{\partial}{\partial z}(wC) \right] + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(-D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] + Q_{sc} \quad eq. [4]$$

donde el término Q_{sc} tiene en cuenta la posible presencia de entradas o salidas de flujo en el volumen de control.

Si se hace tender ΔV a cero obtenemos la expresión final de la ecuación instantánea de transporte para flujos laminares:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \nabla C = \nabla(D \nabla C) + Q_{sc} \quad eq. [5]$$

Cuando el flujo es turbulento, las propiedades hidrodinámicas y termodinámicas sufren fluctuaciones caóticas debido a la aparición de remolinos en el fluido. Bajo estas condiciones, debido al elevado coste computacional que supone estimar la concentración instantánea, resulta interesante calcular los valores medios. Una aproximación usual considera que el campo de velocidades puede ser escrito como $u = \bar{U} + u'$, donde u' representa la contribución de la fluctuación a la componente media \bar{U} . De igual forma se aproxima la concentración $C = \bar{C} + c'$. Sustituyendo en las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{U} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + \bar{W} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = D \nabla^2 \bar{C} - \frac{\partial(\overline{u'c'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{v'c'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{w'c'})}{\partial z} + Q_{sc} \quad eq. [6]$$

donde se ha considerado D de valor constante e isotrópica junto con las siguientes propiedades:

$$\overline{\bar{F} + \bar{G}} = \bar{F} + \bar{G} \quad eq. [7]$$

$$\overline{cF} = c\bar{F} \quad eq. [8]$$

$$\overline{\bar{F}G} = \bar{F} \cdot \bar{G} \quad eq. [9]$$

$$\bar{F}' = 0 \quad eq. [10]$$

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{F}}{\partial x} \quad eq. [11]$$

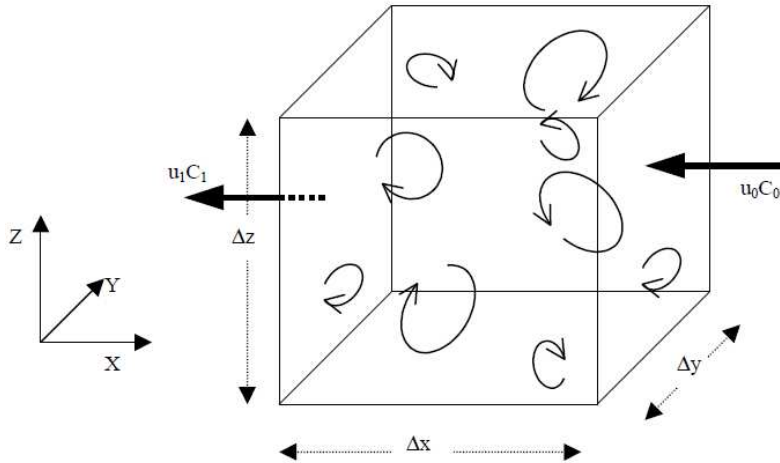


Figura 4.7: Esquema para la deducción de la ecuación del transporte. Adaptado de Mestres (2002)

Observando los términos $\partial(\overline{u'_i c'})/\partial x_i$ se deduce también la contribución de las componentes fluctuantes de la velocidad en el balance de la concentración. De forma análoga a la difusión molecular, estos flujos turbulentos se expresan generalmente como:

$$\overline{u'_i c'} = -K_{ij} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \quad eq. [12]$$

siendo K_{ij} el tensor de 2º orden de difusión turbulenta. Sustituyendo obtenemos la expresión fundamental matemática del transporte:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{U}_i \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} = D \nabla^2 \bar{C} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) + Q_{sc} \quad eq. [13]$$

Debido a su complejidad, difícilmente se resuelve de forma exacta. Para el caso que nos concierne, el del modelaje numérico, se emplean soluciones aproximadas.

4.4 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO

A continuación explicamos el método computacional desarrollado para la obtención de los tiempos de residencia eulerianos (TrE) y lagrangianos (TrL).

4.4.1 Métodos eulerianos

Los métodos puramente eulerianos resuelven directamente la ecuación del transporte (ver [eq. \[1\]](#)) para un subconjunto de puntos fijos del espacio. Estos métodos resuelven el sistema de ecuaciones algebraicas que provienen de discretizar la ecuación del transporte que contiene la variable incógnita: la concentración en un número fijo de puntos. La transformación de la ecuación diferencial inicial al sistema de ecuaciones algebraicas se realiza generalmente mediante el uso de técnicas como las diferencias finitas.

El empleo de métodos eulerianos para el cálculo de procesos de transporte requiere en muchas ocasiones de una solución simultánea de un operador hiperbólico, correspondiente a la componente advectiva del transporte, además de un operador parabólico que describe la parte difusiva.

Cuando el proceso difusivo es el dominante, las técnicas numéricas estándar eulerianas, cuya naturaleza radica en la continuidad de los resultados computados, pueden dar una solución del problema. Por el contrario, en caso de que el proceso de transporte dominante sea el advectivo, dichas técnicas presentan oscilaciones severas que derivan en un sobredimensionamiento, minimización o valores negativos en los puntos donde se dan unos gradientes mayores de los resultados escalares ([Glass and Rodi, 1982](#)). Esto puede evitarse usando aproximaciones de mayor orden en el espacio o el tiempo.

4.4.1.1 Tiempo de residencia euleriano (TrE)

Como ya se ha definido en el apartado 4.1, el tiempo de residencia euleriano es el tiempo requerido para que la masa total de una traza conservativa originalmente disuelta en todo el dominio, se reduzca en un factor $1/e$.

4.4.1.1.1 Origen del factor $1/e$

Dada una cantidad de sustancia conocida que es inyectada de forma instantánea en el instante t_0 en una masa homogénea de agua de concentración inicial C_0 y asumiendo las siguientes hipótesis:

- no se aporta ninguna cantidad posterior a dicho instante (t_0)
- el volumen de la masa de agua se mantiene constante
- el flujo en el contorno es constante

la evolución de la concentración de dicha sustancia se puede expresar mediante la siguiente forma exponencial:

$$C(t - t_0) = C_0 e^{-\frac{Q}{V}(t-t_0)} = C_0 e^{-\frac{t-t_0}{\theta}} \quad \text{eq. [14]}$$

con:

Q = caudal constante V = volumen constante θ = constante

$t = \text{tiempo}$

$t_0 = \text{tiempo inicial}$

$t = \text{tiempo tal que } t > t_0$

Asumiendo $t_0 = 0$ y que conceptualmente el tiempo que tardaría el agua entrante en renovar el volumen V con un caudal presente Q (tal que $Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{salida}}$) es el tiempo de residencia euleriano, entonces:

$$TrE = \frac{V}{Q} \quad eq. [15]$$

Sustituyendo:

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{1}{TrE} * (t)} \quad eq. [16]$$

consecuentemente, la concentración para $t = TrE$ resulta:

$$C(TrE) = C_0 e^{-\frac{1}{TrE} * (TrE)} = C_0 \cdot e \quad eq. [17]$$

cuya proporción con respecto a la inicial es:

$$\frac{C(TrE)}{C_0} = \frac{C_0 \cdot e}{C_0} = e \quad eq. [18]$$

4.4.1.2 Cálculo

Se ha realizado a partir de una simulación ROMS que oscila entre las 220 y las 249 horas dependiendo de cada caso. Para ello se han repartido de forma homogénea trazas pasivas a lo largo y ancho del dominio interior del puerto. Se ha repetido el proceso para 4 condiciones hidrodinámicas iniciales distintas, las asociadas a las 4 fases de marea: llenante, pleamar, vaciante y bajamar. Además, esto se ha realizado a dos niveles de profundidad: *fondo* y *superficie*.

Inicialmente se ha asignado a cada coordenada del dominio la propiedad de “*punto interior* o *exterior*” del puerto, dependiendo de la pertenencia, o no, a éste. Posteriormente, se ha impuesto la presencia de una trazador pasivo no sedimentable de concentración inicial $C_0 = 1$ en todos los puntos interiores. Por el contrario, en los puntos exteriores se ha impuesto concentración nula. El TrE es entonces calculado como el tiempo que tarda el agua externa al volumen de control (asociado a cada coordenada) en ocupar aproximadamente el 63 % de dicho volumen. En otras palabras, el tiempo que la concentración tarda en decaer $(1 - 1/e) \cdot 100 = 63'2 \%$.

4.4.2 Métodos lagrangianos

Los métodos lagrangianos resuelven la expresión de la ecuación de transporte (ver [eq. \[13\]](#)) para un conjunto de partículas que tienen que ser vistas como los nodos de una malla deformable que se mueve con el flujo.

Para ello, parten de la ecuación del transporte y resuelven el conjunto de ecuaciones que derivan de aplicar el transporte de masa de forma discreta a una partícula:

$$\vec{X}_i(t + \Delta t) = \vec{X}_i(t) + \vec{u}_i \Delta t \quad i = 1 \div N \quad eq. [19]$$

siendo Δt un diferencial de tiempo

\vec{X}_i la posición de la partícula i

\vec{u}_i el vector velocidad de la partícula i

N el número de partículas

Los métodos basados en trazas de partículas han sido extensamente usados durante años con el objetivo de modelar el transporte de soluto de forma uni, bi o tridimensional en suelos. Contrariamente, las aplicaciones para el cálculo de transporte en superficie han sido escasas y no ha sido hasta fechas más recientes que éstas se han desarrollado ([Dimou and Adams, 1993](#)).

La principal ventaja de los modelos basados en el seguimiento de trazas en suelos reside en la presencia de pequeños gradientes, los cuales pueden ser modelados sin una elevada resolución de la malla. Para el caso que nos concierne, en aguas superficiales, la motivación principal recae en la simplicidad de simulación de los procesos dominados por el transporte advectivo.

Para una mayor simplicidad de cálculo, como es práctica habitual, no se ha tenido en cuenta el proceso difusivo en el cálculo de los TrL. El hecho de que para contemplar la componente difusiva del transporte y la aleatoriedad de esta requiera resolver un elevado número de veces por partícula el cálculo del mismo problema, supone un coste computacional excesivo.

4.4.2.1 Tiempo de residencia lagrangiano (TrL)

Como ya se ha definido en el apartado 4.1, el tiempo de residencia lagrangiano es el tiempo que una partícula de agua emplearía hasta abandonar el dominio desde su posición de estudio inicial.

4.4.2.2 Cálculo

La trayectoria de las partículas de agua se ha obtenido a partir de los resultados hidrodinámicos con una simulación ROMS de 220 horas (aproximadamente). En su configuración inicial, dichas partículas se han distribuido a lo largo y ancho del dominio de forma uniforme. Dicho proceso se ha repetido bajo 4 condiciones hidrodinámicas iniciales

distintas asociadas a las cuatro fases de marea: vaciante, bajamar, llenante y pleamar. Dicho proceso también se ha computado a dos niveles de profundidad: fondo y superficie.

A continuación se ha asignado a cada coordenada del dominio la propiedad de “punto *interior* o *exterior*” del puerto, dependiendo de la pertenencia, o no, a éste. El TrL ha sido entonces calculado como el tiempo que tarda una partícula en abandonar el dominio del puerto.

Esta metodología nos ha permitido clasificar las partículas de agua en 3 clases dependiendo de los resultados obtenidos:

- **Clase 1:** Partículas que en el intervalo de las 220 horas (tiempo de simulación) abandonan el dominio del puerto al atravesar la bocana.

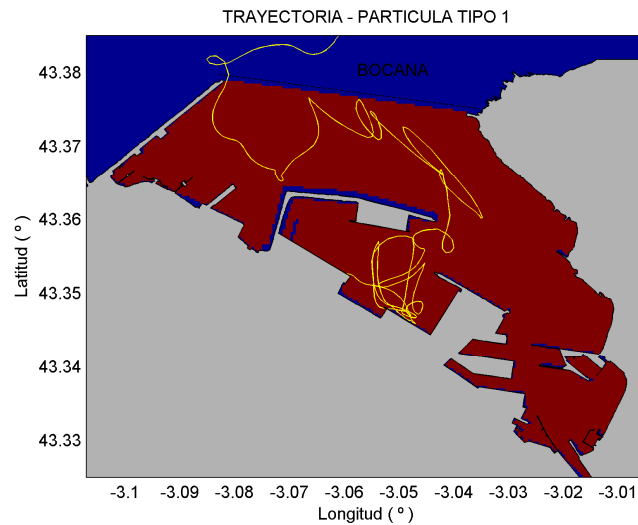


Figura 4.8: Trayectoria de una partícula tipo 1. Cruza la línea divisoria puerto – mar, la bocana.

- **Clase 2:** Partículas cuya trayectoria no sale del puerto en el intervalo temporal de estudio:

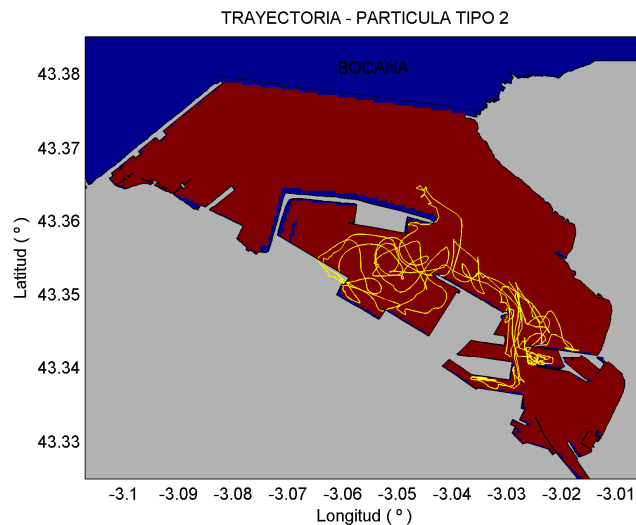


Figura 4.9: Trayectoria de una partícula tipo 2

El tiempo de residencia lagrangiano asignado a esta clase de partículas es el máximo computado. Dicho valor varía sensiblemente en función de la fase de marea impuesta inicialmente debido a los diferentes tiempos de simulación computados en cada escenario:

$$TrL_{vaciante} = 226 \text{ h.}$$

$$TrL_{bajamar} = 223 \text{ h.}$$

$$TrL_{llenante} = 220 \text{ h.}$$

$$TrL_{pleamar} = 217 \text{ h.}$$

- **Clase 3:** Partículas cuya trayectoria se estanca en un punto del contorno debido a que el método numérico empleado por ROMS tiene por resultado un campo de velocidades que en algunos puntos converge a cero.

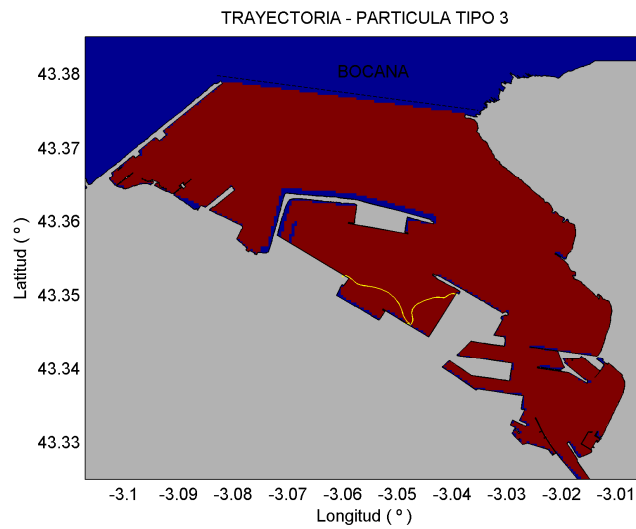


Figura 4.10: Trayectoria de una partícula tipo 3

El tiempo de residencia asignado a esta clase de partículas es, una vez más, el máximo computado en cada caso:

$$TrL_{vaciante} = 226 \text{ h.}$$

$$TrL_{bajamar} = 223 \text{ h.}$$

$$TrL_{llenante} = 220 \text{ h.}$$

$$TrL_{pleamar} = 217 \text{ h.}$$

4.5 COEFICIENTE DE VARIABILIDAD (C_v)

Con el objetivo de entender la influencia de la fase de marea en el cálculo de los tiempos de residencia, al igual que Cucco et al. (2009) se ha empleado una variable (C_v) denominada “coeficiente de variabilidad”. Ésta se expresa de la siguiente forma:

$$\overline{Tr} = \sum_{i=1}^N \frac{Tr_i}{N}$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(Tr_i - \overline{Tr})^2}{N}$$

$$Cv = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\overline{Tr}}$$

donde:

Tr_i = Tiempo de residencia asociado al punto espacial "i"

N = nº de escenarios (las 4 fases de marea) para los que se ha evaluado el tiempo de residencia de dicho punto

\overline{Tr} = Tiempo de residencia medio de los 4 escenarios asociado al punto

σ^2 = Varianza; $\sqrt{\sigma^2}$ = Desviación estándar

Valores próximos a 0 apuntarán a una variabilidad baja respecto a la fase de marea en la que se inicia el cálculo. Por el contrario, valores próximos a 1 apuntarán a una variabilidad elevada, o lo que es lo mismo, una mayor susceptibilidad al cambio de la fase de marea con la que se inicia la evolución del trazador.

4.6 ZONIFICACIÓN

Finalmente, para facilitar la explicación de los resultados obtenidos en las aguas del puerto de Bilbao, este se ha dividido en 4 zonas:

- 1) Punta Lucero
- 2) Zona de Canal
- 3) Abra exterior
- 4) Abra interior

En la Figura 4.11 se muestra la división establecida:

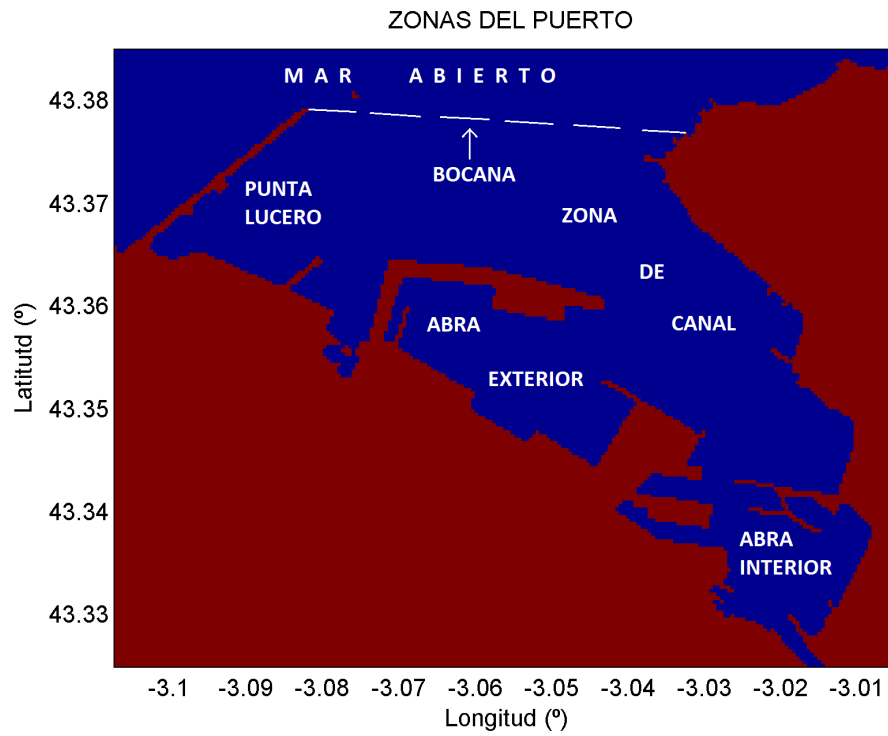


Figura 4.11: División del Puerto de Bilbao en 4 zonas. Punta Lucero, Zona de Canal, Abra exterior y Abra interior

5 RESULTADOS

En este apartado se recogen los resultados obtenidos del trabajo.

5.1 TIEMPOS DE RESIDENCIA EULERIANOS

5.1.1 FONDO

Como puede observarse en las Figura 5.1 a Figura 5.4, los tiempos de residencia calculados para el fondo aumentan de forma progresiva a medida que las aguas se adentran en el puerto, presentando valores mínimos en la bocana y alcanzando máximos en el abra interior. Se observa además un pequeño aumento gradual de los tiempos de residencia sujetos a la fase de marea en el siguiente orden: vaciante, bajamar, llenante, pleamar. Los tiempos no presentan grandes discontinuidades en el espacio.

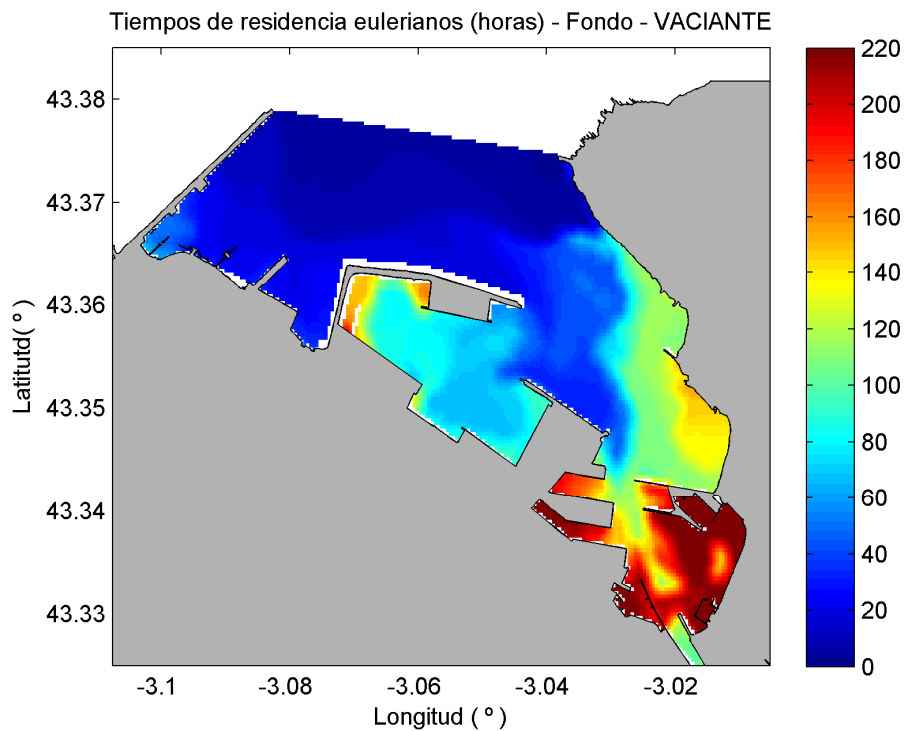


Figura 5.1: Tiempos de residencia eulerianos en fondo (horas) asociados a la fase de marea vaciante

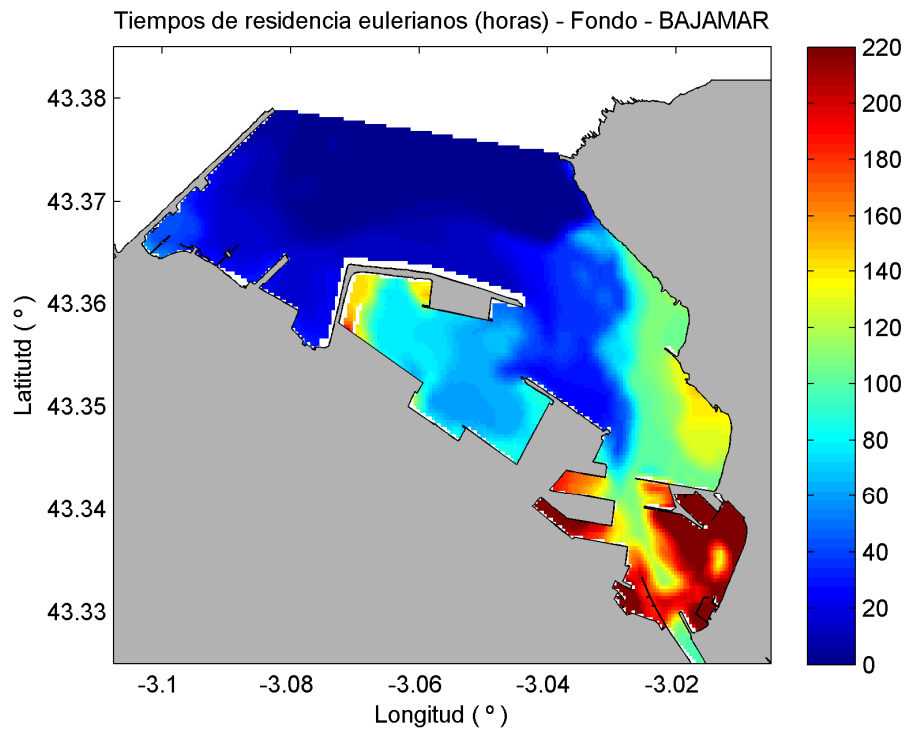


Figura 5.2: Tiempos de residencia eulerianos en fondo (horas) asociados a la fase de marea bajamar

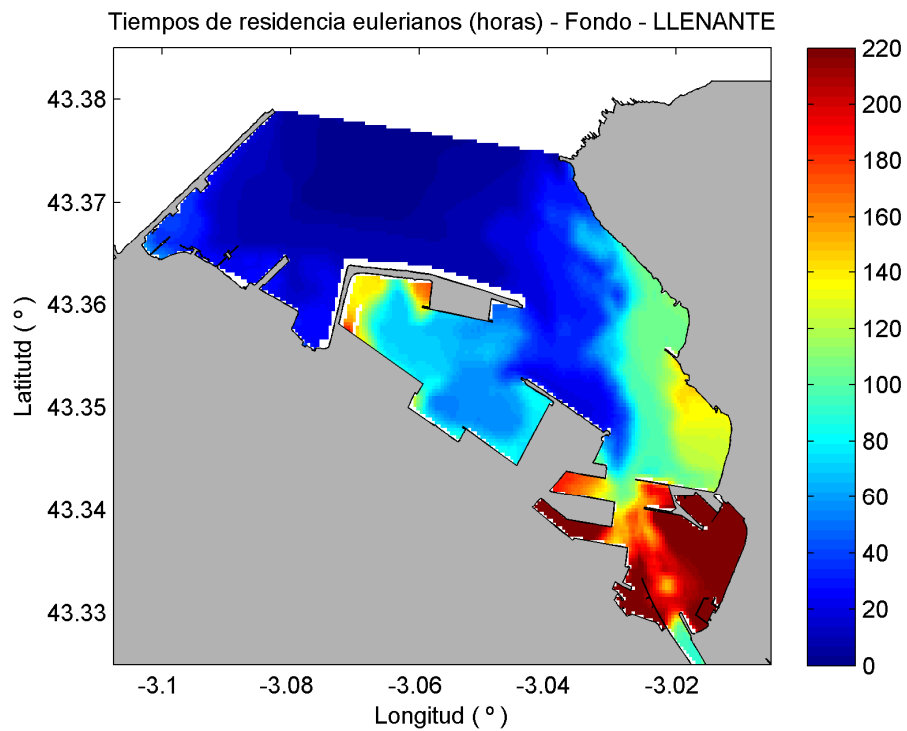


Figura 5.3: Tiempos de residencia eulerianos en fondo (horas) asociados a la fase de marea llenante

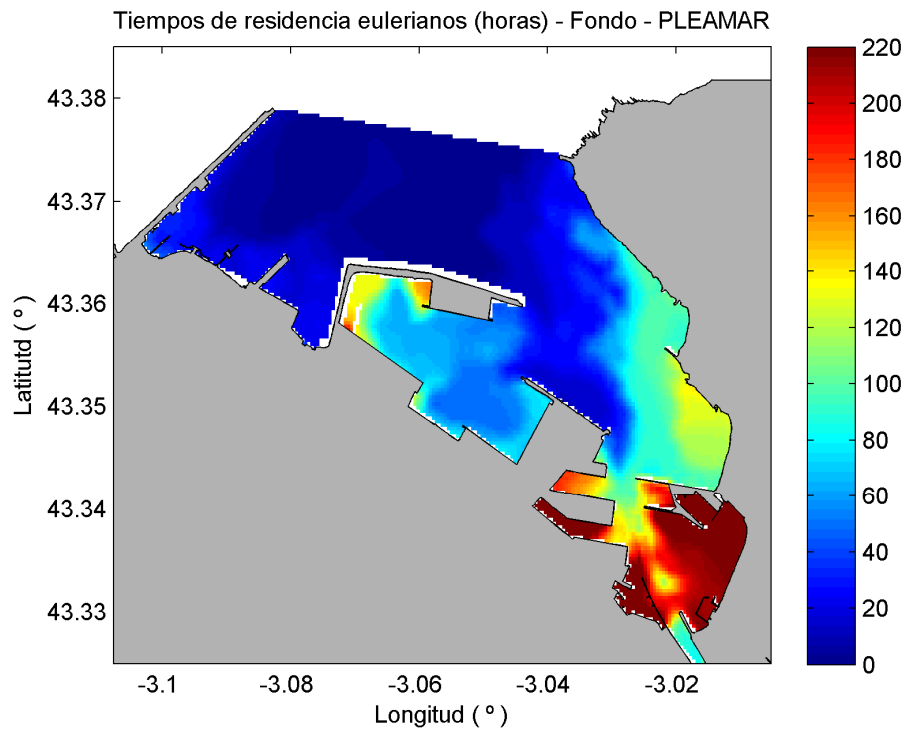


Figura 5.4: Tiempos de residencia eulerianos en fondo (horas) asociados a la fase de marea pleamar

Los tiempos de residencia promedio de las cuatro zonas características son:

ZONA	TrE en el FONDO
Punta Lucero	35 h.
Zona de Canal	100 h.
Abra exterior	70 h.
Abra interior	200 h.

Tabla 5.1: Tiempos de residencia promedio eulerianos en el fondo de las 4 zonas en las que se ha dividido el puerto

5.1.2 SUPERFICIE

Los tiempos de residencia calculados en la superficie adoptan valores relativamente bajos (entre 20 y 50 horas) en Punta Lucero, la zona de canal y el abra exterior (ver [Figura 5.5](#) a [Figura 5.8](#)). En el abra interior, los tiempos se disparan y alcanzan valores de hasta 200 horas. Los tiempos de residencia no presentan grandes discontinuidades en el espacio.

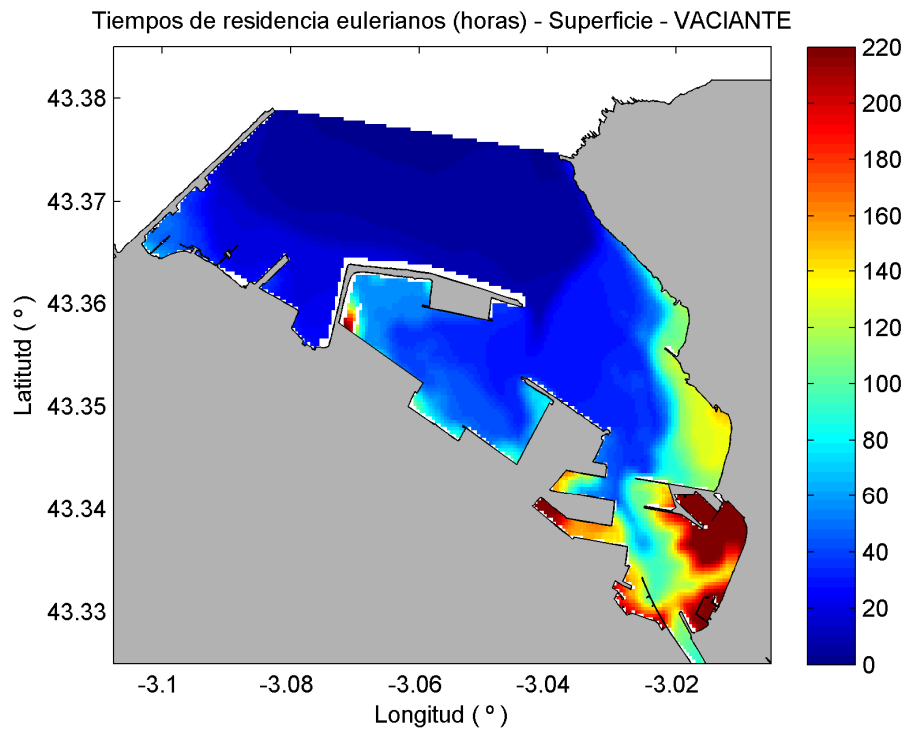


Figura 5.5: Tiempos de residencia eulerianos en superficie (horas) asociados a la fase de marea vaciante

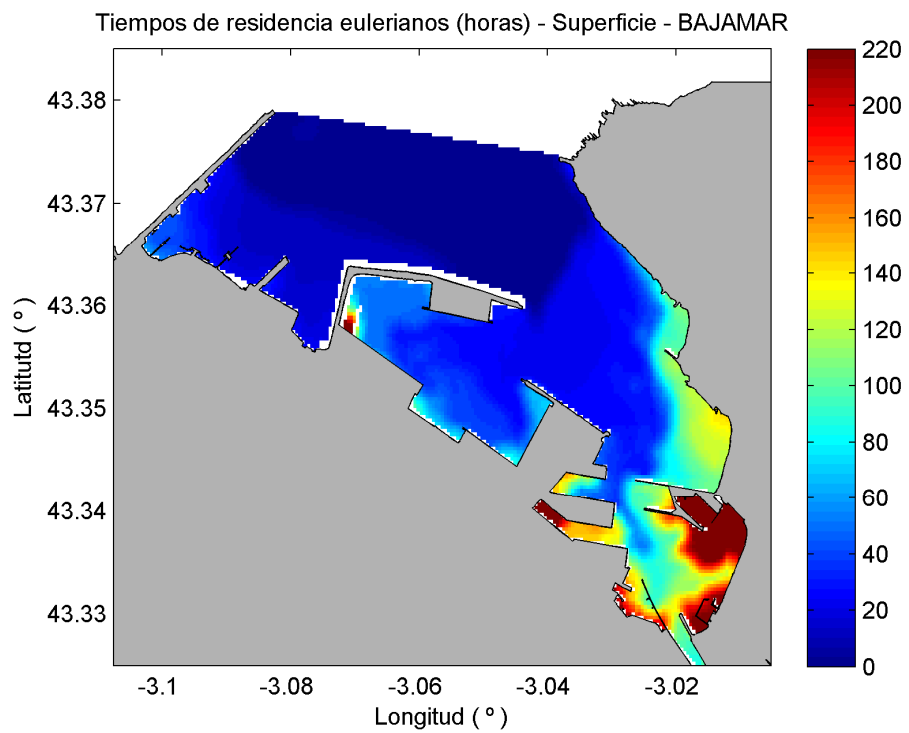


Figura 5.6: Tiempos de residencia eulerianos en superficie (horas) asociados a la fase de marea bajamar

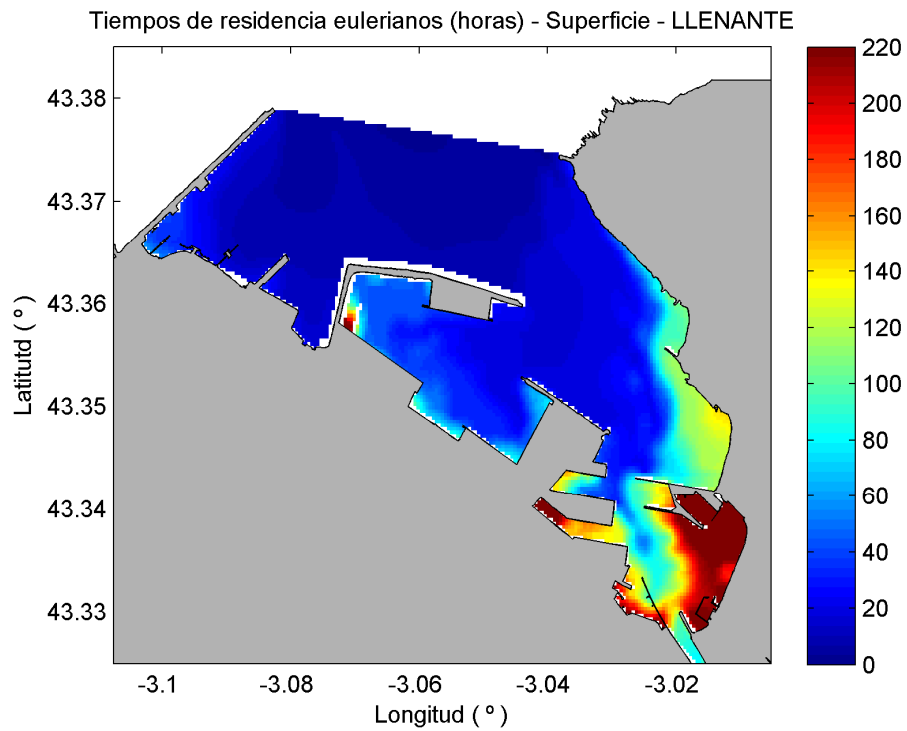


Figura 5.7: Tiempos de residencia eulerianos en superficie (horas) asociados a la fase de marea llenante

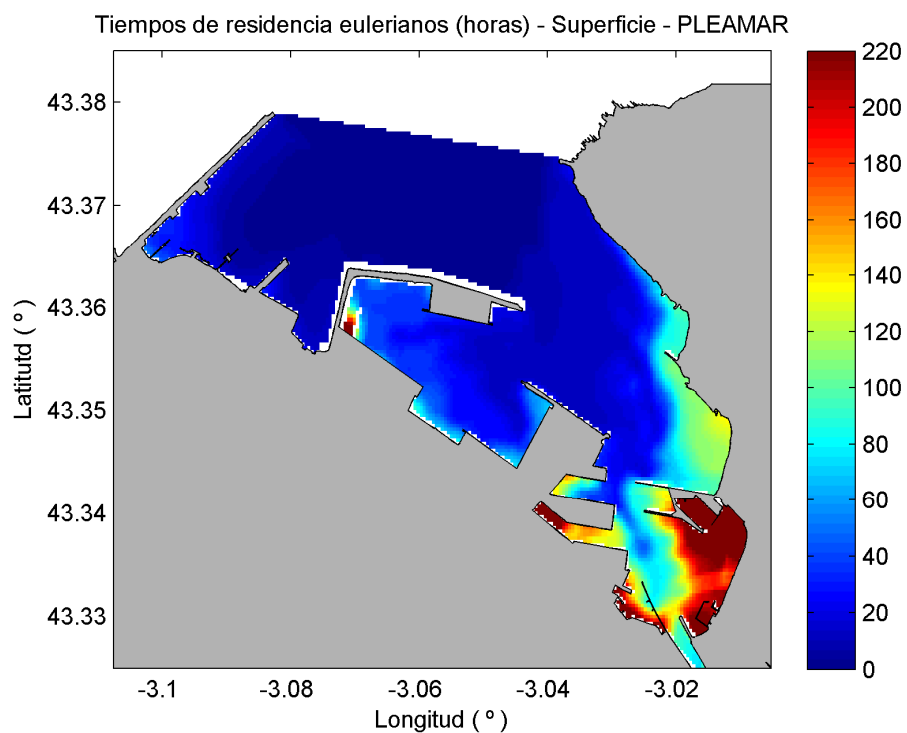


Figura 5.8: Tiempos de residencia eulerianos en superficie (horas) asociados a la fase de marea pleamar

Los tiempos de residencia promedio de las cuatro zonas características son:

ZONA	TrE en la SUPERFICIE
Punta Lucero	20 h.

Zona de Canal	50 h.
Abra exterior	40 h.
Abra interior	140 h.

Tabla 5.2: Tiempos de residencia promedio eulerianos en la superficie de las 4 zonas en las que se ha dividido el puerto

5.2 TIEMPOS DE RESIDENCIA LAGRANGIANOS

5.2.1 FONDO

En cuanto a la distribución espacial de los tiempos de residencia lagrangianos calculados en el fondo a lo largo de la zona de canal y el abra interior es algo caótica, alcanzándose valores máximos en el abra exterior e interior (ver [Figura 5.9](#) a [Figura 5.12](#)). En Punta Lucero también se observa como en un corto espacio los valores entorno a las 40 horas se disparan hasta las 170 horas. Destaca una zona de dimensiones considerables en el centro de la bocana en la que se alcanzan valores entorno las 150 horas. Dicha zona se localiza en la zona de canal y el abra exterior con un ligero desplazamiento a lo largo de las cuatro fases.

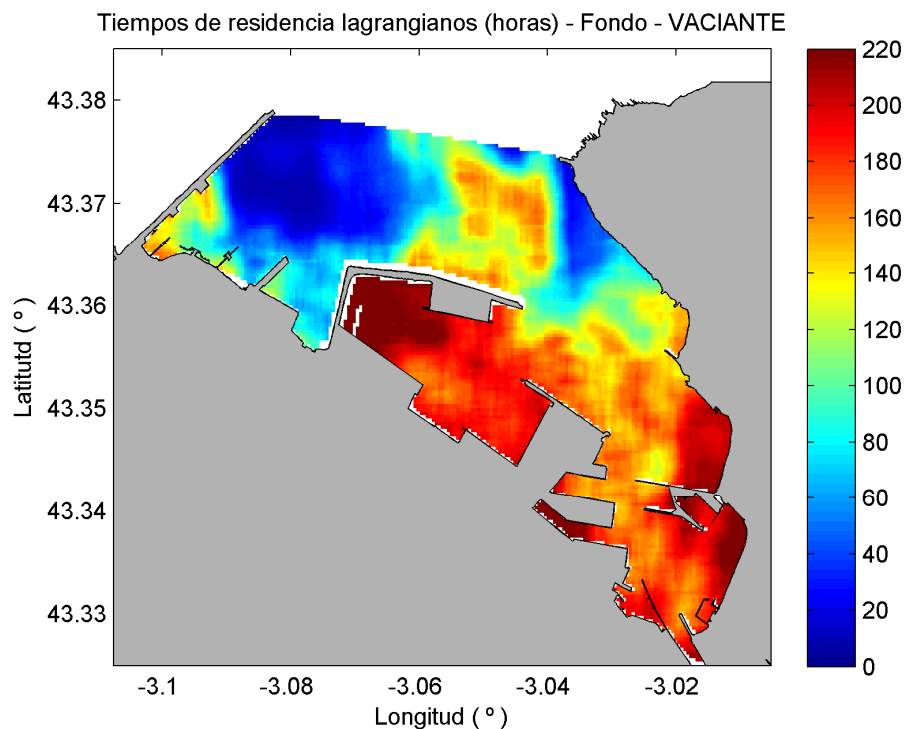


Figura 5.9: Tr Tiempos de residencia lagrangianos en fondo (horas) asociados a la fase de marea vaciante

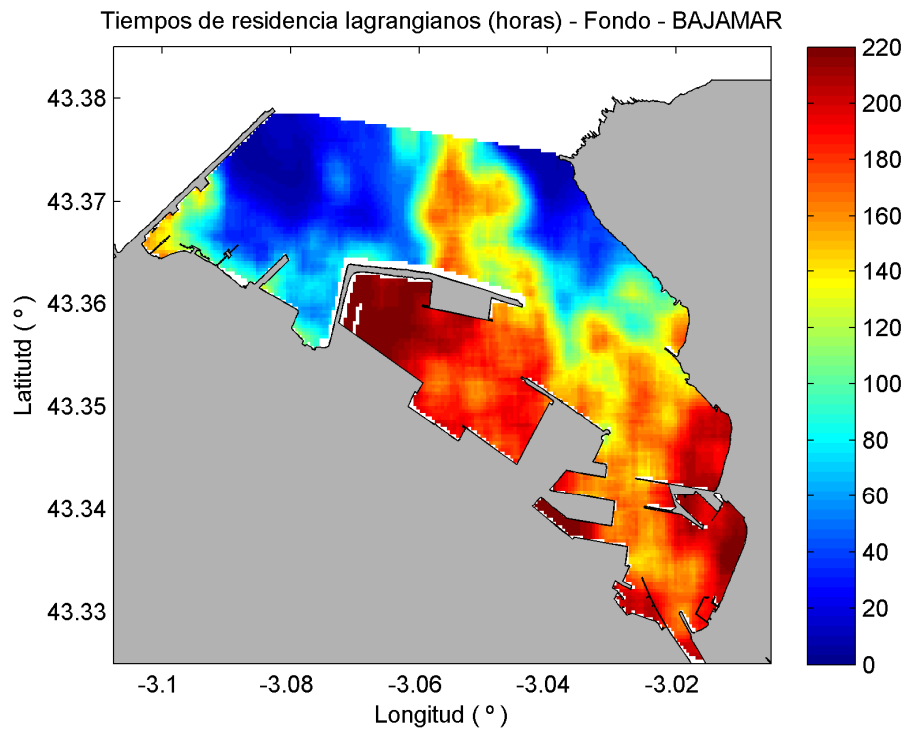


Figura 5.10: Tiempos de residencia lagrangianos en fondo (horas) asociados a la fase de marea bajamar

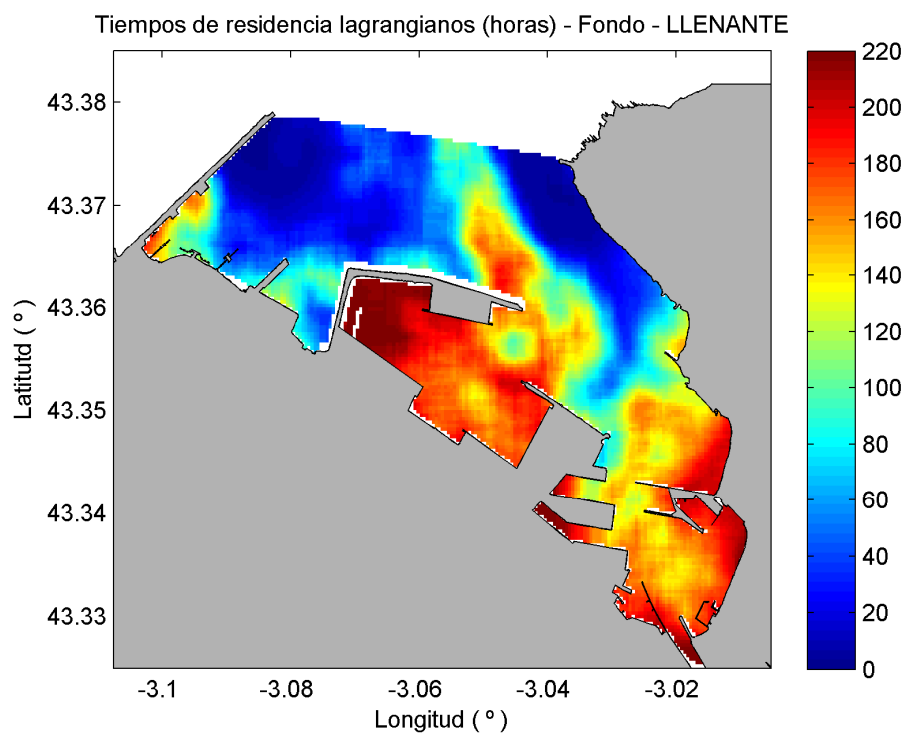


Figura 5.11: Tiempos de residencia lagrangianos en fondo (horas) asociados a la fase de marea llenante

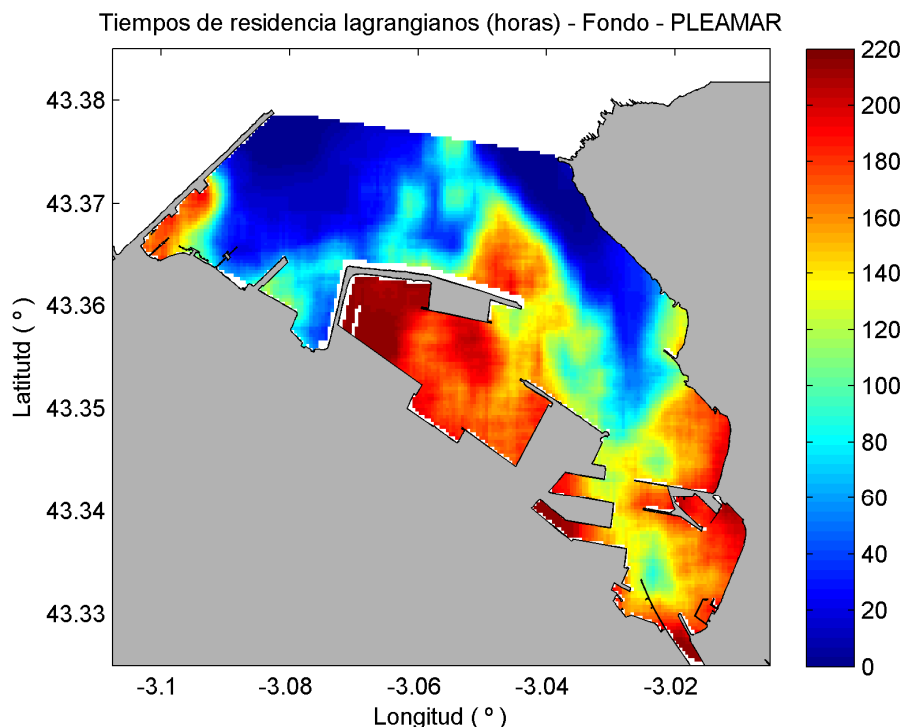


Figura 5.12: Tiempos de residencia lagrangianos en fondo (horas) asociados a la fase de marea pleamar

Los tiempos de residencia promedio de las cuatro zonas características son:

ZONA	TrL en el FONDO
Punta Lucero	Caótico \approx 90 h.
Zona de Canal	Caótico \approx 100 h.
Abra exterior	170 h.
Abra interior	150 h.

Tabla 5.3: Tiempos de residencia promedio lagrangianos en el fondo de las 4 zonas en las que se ha dividido el puerto

Los tiempos de residencia presentan valores mínimos en la bocana.

5.2.2 SUPERFICIE

En el caso de los TrL calculados en superficie (ver [Figura 5.13](#) a [Figura 5.17](#)), la distribución espacial de los tiempos de residencia en Punta Lucero para las fases de marea llenante y pleamar es caótica, con valores dispares entre el rango de las 20 y las 200 horas. No ocurre lo mismo en las fases vaciante y bajamar, en las que en Punta Lucero se obtiene una distribución espacial relativamente homogénea, entorno las 60 horas. Para las fases de llenante y pleamar se alcanza una homogeneidad casi perfecta a lo largo de la bocana con valores próximos a las 20 horas. Por el contrario, la zona de canal presenta una vez más valores que aumentan a medida que las aguas se adentran en el puerto, yendo de las 20 a las 180 horas. En el abra exterior e interior los valores giran entorno las 200 horas.

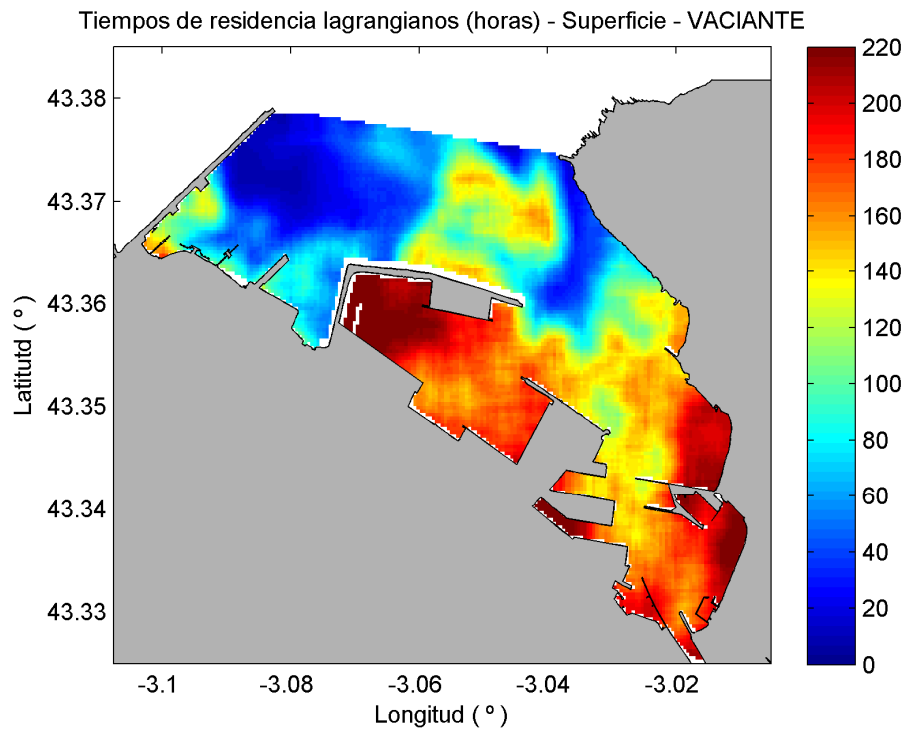


Figura 5.13: Tiempos de residencia lagrangianos en superficie (horas) asociados a la fase de marea vaciante

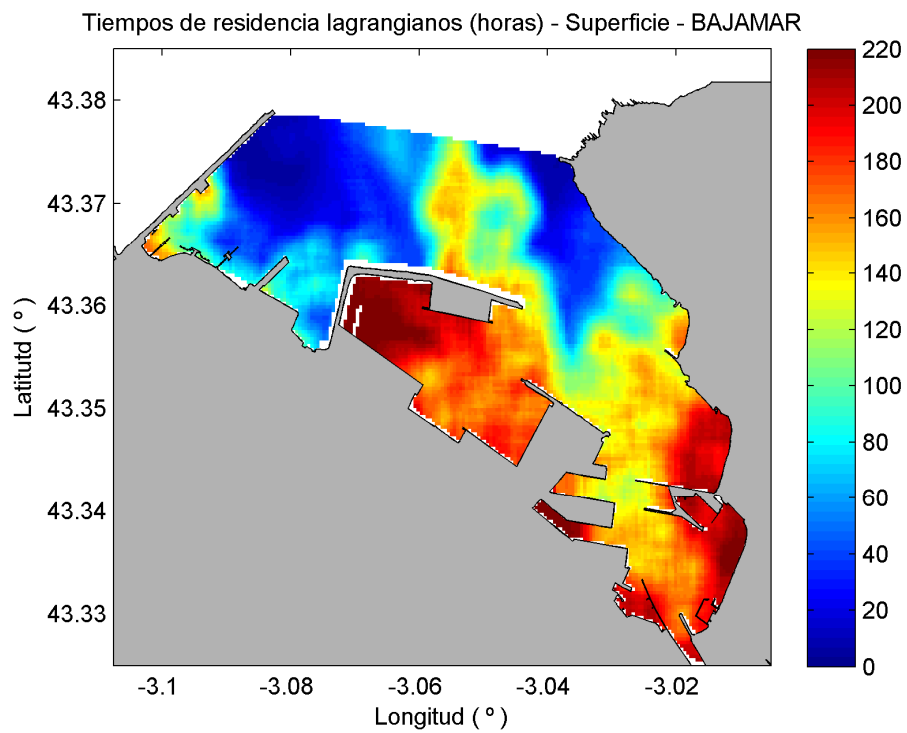


Figura 5.14: Tiempos de residencia lagrangianos en superficie (horas) asociados a la fase de marea bajamar

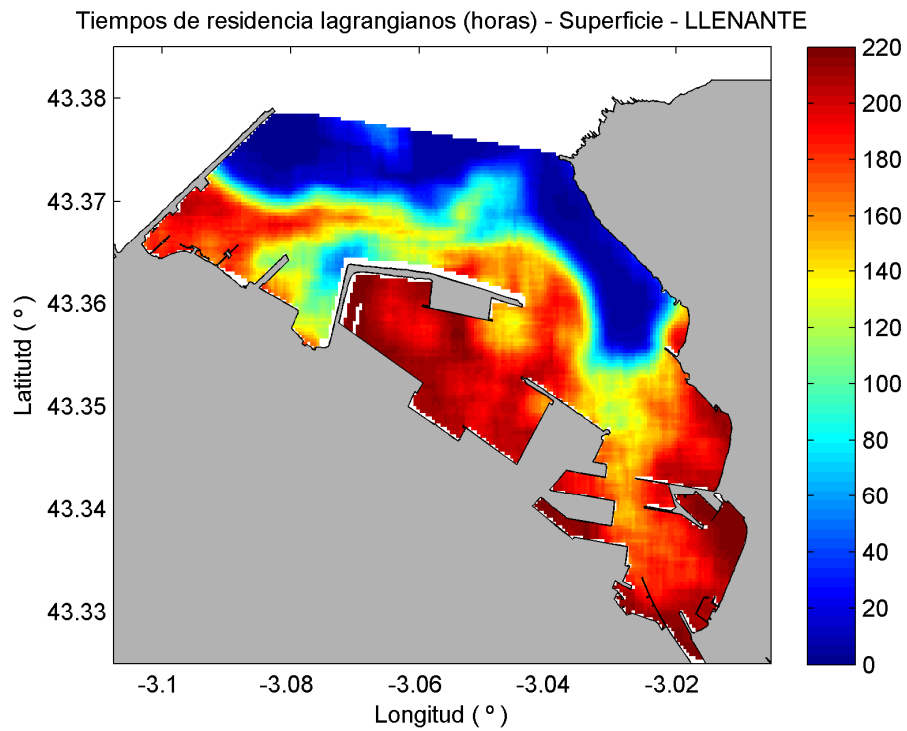


Figura 5.15: Tiempos de residencia lagrangianos en superficie (horas) asociados a la fase de marea llenante

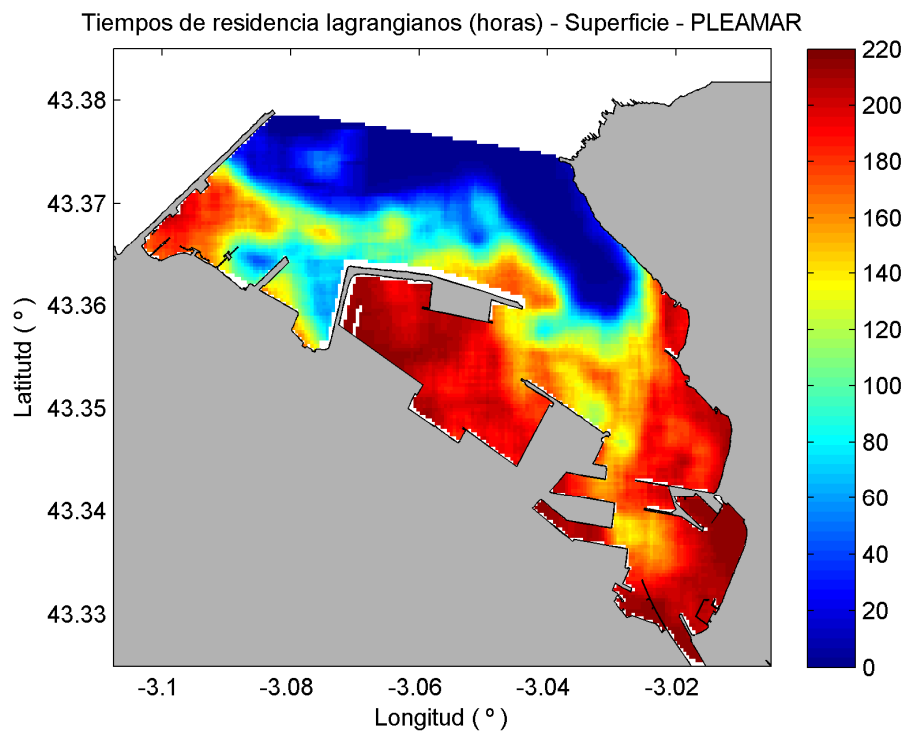


Figura 5.16: Tiempos de residencia lagrangianos en superficie (horas) asociados a la fase de marea pleamar

Los tiempos de residencia promedio de las cuatro zonas características son:

ZONA	TrL en la SUPERFICIE
Punta Lucero	Caótico

Zona de Canal	Caótico ≈ 140 h.
Abra exterior	210 h.
Abra interior	200 h.

Tabla 5.4: Tiempos de residencia promedio lagrangianos en la superficie de las 4 zonas en las que se ha dividido el puerto

Un vez más, los tiempos de residencia presentan valores mínimos en la bocana.

5.3 COEFICIENTE DE VARIABILIDAD. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

5.3.1 Cv - TIEMPOS DE RESIDENCIA EULERIANOS

El tiempo de residencia euleriano, tanto en profundidad como en superficie, presenta una variabilidad espacial asociada a las diferentes fases de marea elevada en la zona de entrada al puerto, la bocana, zona de intercambio de aguas (ver [Figura 5.17](#) y [Figura 5.18](#)). En dicha zona, el Cv promedio ronda un valor comprendido entre 0.7 y 0.9 tanto para el cálculo de superficie como de fondo, perteneciendo a éste último los valores más elevados. El resto del puerto (zona de canal, abra exterior e interior) presenta una gran homogeneidad con valores entorno a 0.15.

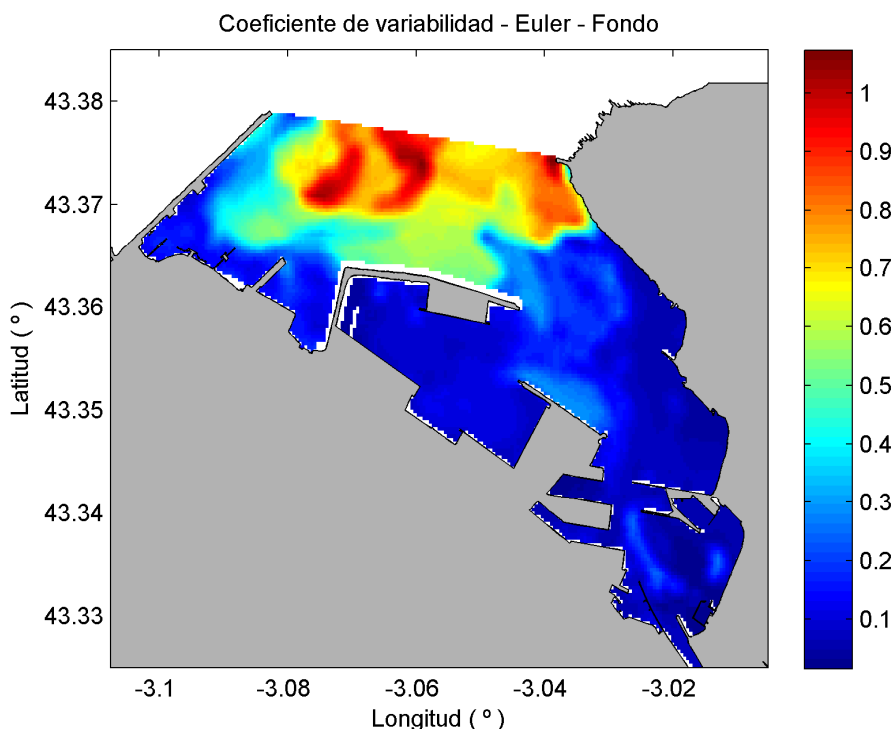


Figura 5.17: Coeficientes de variabilidad entre los tiempos de residencia eulerianos de las diferentes fases de marea en fondo

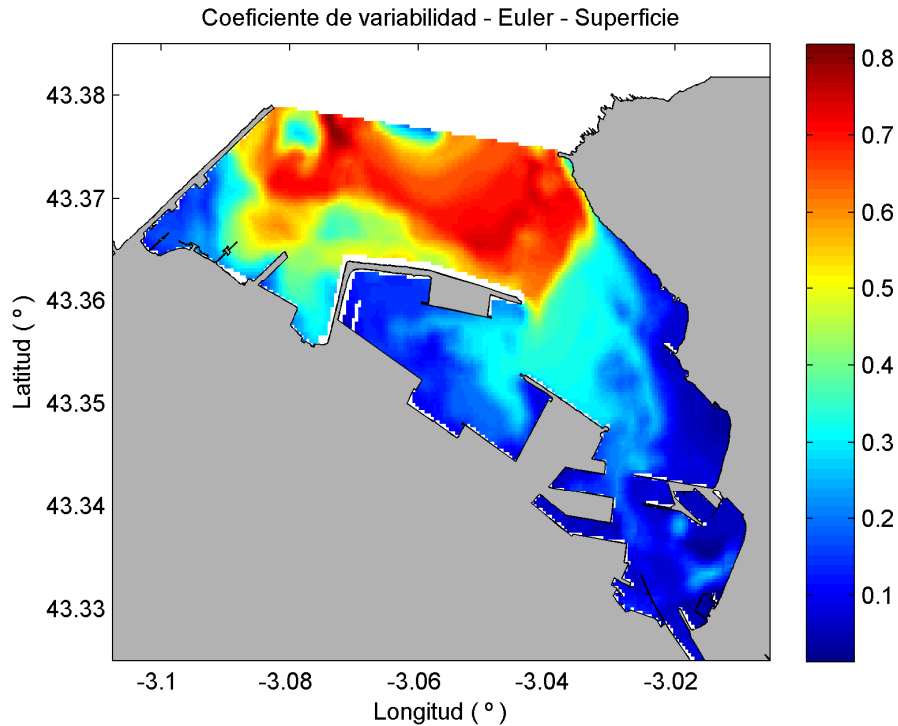


Figura 5.18: Coeficientes de variabilidad entre los tiempos de residencia eulerianos de las diferentes fases de marea en superficie

5.3.2 Cv - TIEMPOS DE RESIDENCIA LAGRANGIANOS

Los tiempos de residencia calculados de forma lagrangiana presentan una variabilidad a lo largo de todo el dominio difícilmente inferior a 0,4 (ver [Figura 5.19](#) y [Figura 5.20](#)). Las mayores variaciones de éstos, debidas a la variabilidad de marea, se han encontrado en el área cercana a la bocana. Allí, la dispersión de los resultados se dispara de forma relevante para los tiempos de superficie, obteniéndose un valor promedio de 0.9, el cual contrasta con los 0.6 obtenidos en fondo. Además, estos máximos se concentran no solo en la zona de entrada de aguas sino también a lo largo de la zona de canal con un valor promedio de 0.5.

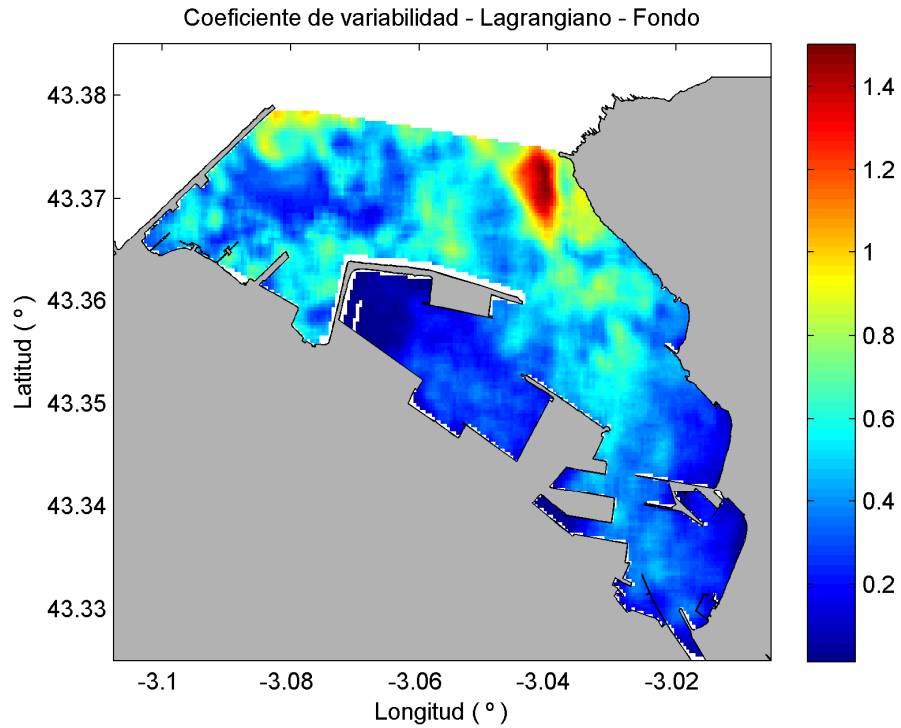


Figura 5.19: Coeficientes de variabilidad entre los tiempos de residencia lagrangianos de las diferentes fases de marea en fondo

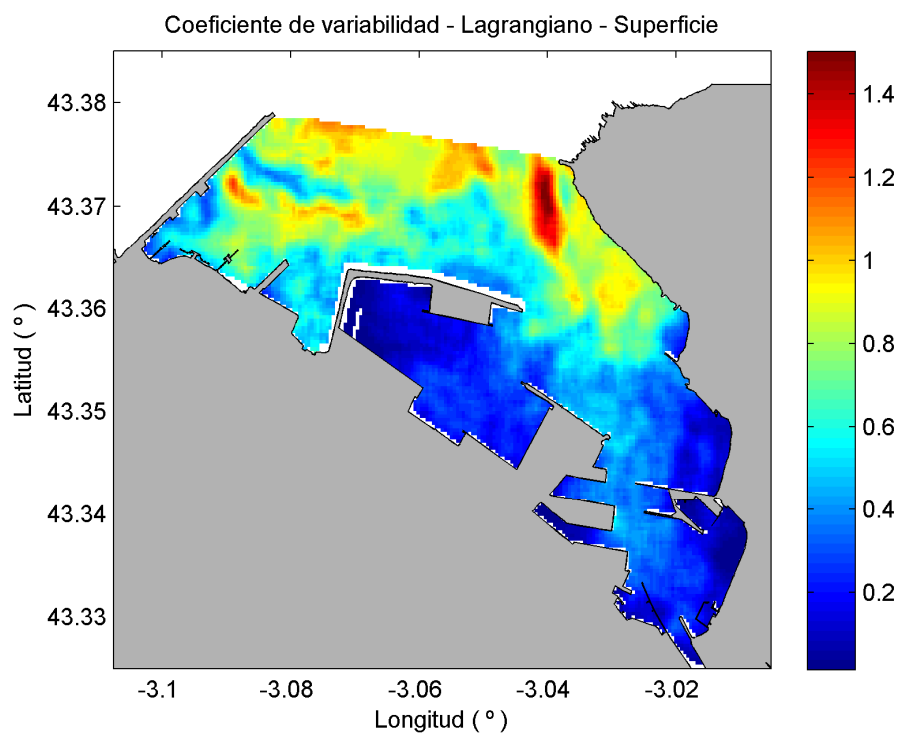


Figura 5.20: Coeficientes de variabilidad entre los tiempos de residencia lagrangianos de las diferentes fases de marea en superficie

5.4 DIFERENCIAS FONDO – SUPERFICIE

5.4.1 MÉTODO EULERIANO

Los tiempos de residencia eulerianos presentan valores mayores en fondo que en superficie (ver [Figura 5.21](#) a [Figura 5.24](#)). Esta condición se extiende a lo largo de todo el dominio y se acentúa de forma gradual a medida que las aguas se adentran en el puerto, alcanzando valores máximos en el abra interior. La parte más refugiada del abra exterior y el eje central de la zona de canal experimentan las mayores diferencias.

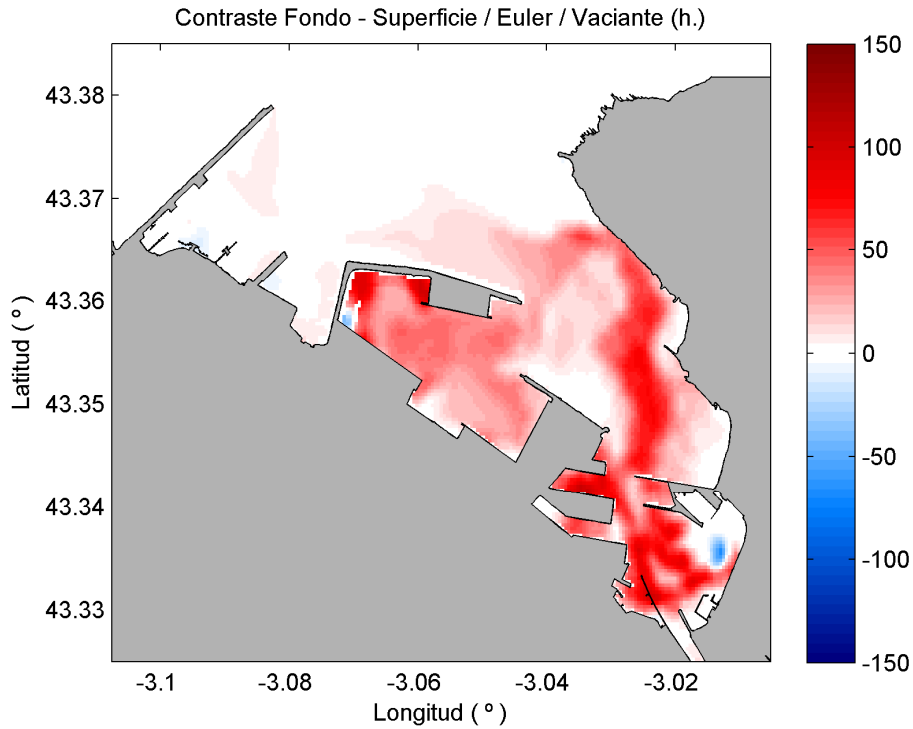


Figura 5.21: Diferencia (en horas) de los tiempos de residencia eulerianos entre el fondo y la superficie asociados a la fase de marea vaciante

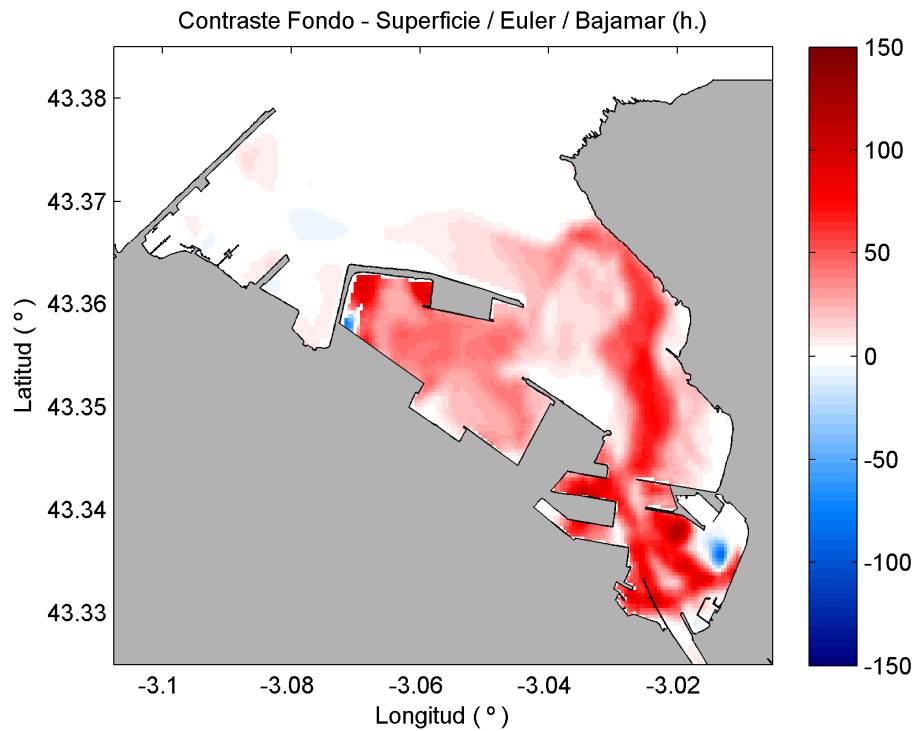


Figura 5.22: Diferencia (en horas) de los tiempos de residencia eulerianos entre el fondo y la superficie asociados a la fase de marea bajamar

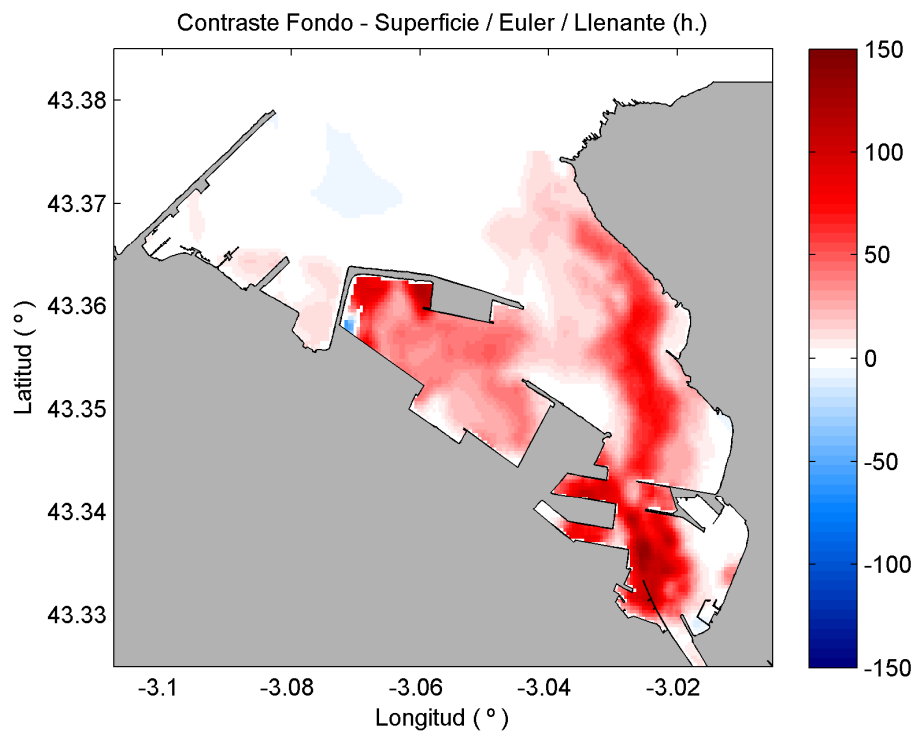


Figura 5.23: Diferencia (en horas) de los tiempos de residencia eulerianos entre el fondo y la superficie asociados a la fase de marea llenante

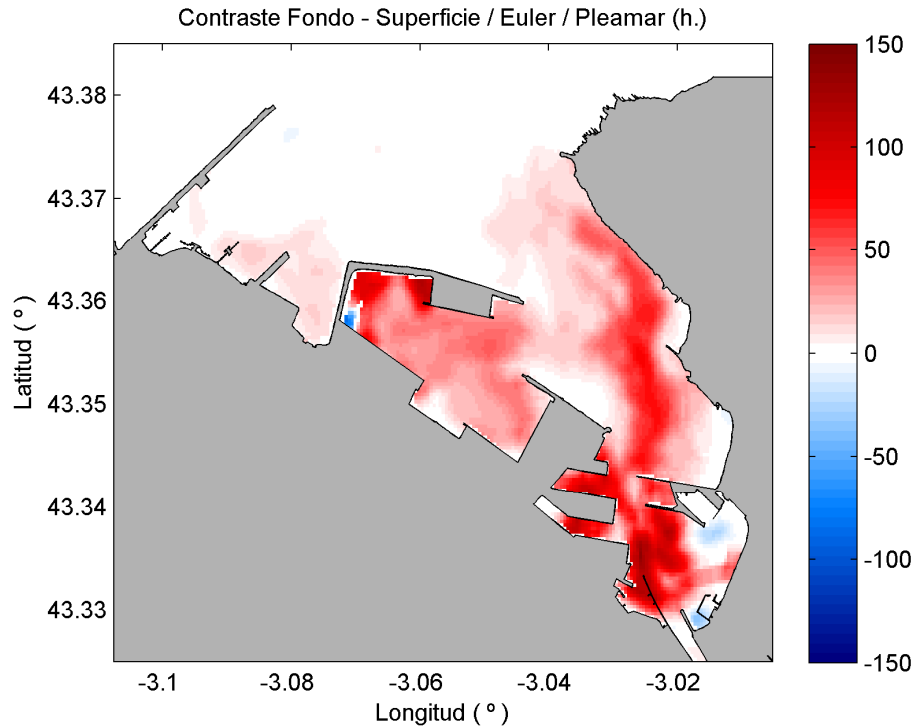


Figura 5.24: Diferencia (en horas) de los tiempos de residencia eulerianos entre el fondo y la superficie asociados a la fase de marea pleamar

5.4.2 MÉTODO LAGRANGIANO

Para el cálculo lagrangiano, en las fases de marea vaciante y bajamar se alternan zonas en las que en el fondo se obtienen valores mayores que en superficie y viceversa (ver [Figura 5.25](#) y [Figura 5.26](#)).

Por otro lado, en las fases de marea llenante y pleamar (ver [Figura 5.27](#) y [Figura 5.28](#)), en la zona cercana a la bocana se dan tiempos de residencia lagrangianos mayores en profundidad mientras que en el resto del dominio estos tienen lugar preferentemente en la superficie.

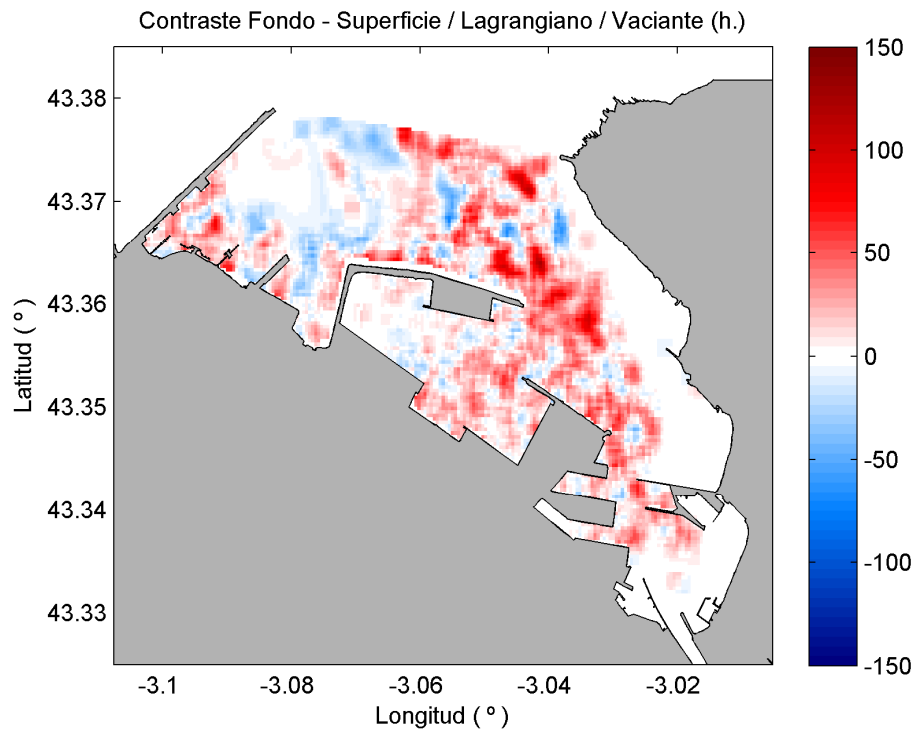


Figura 5.25: Diferencia (en horas) de los tiempos de residencia lagrangianos entre el fondo y la superficie asociados a la fase de marea vaciante

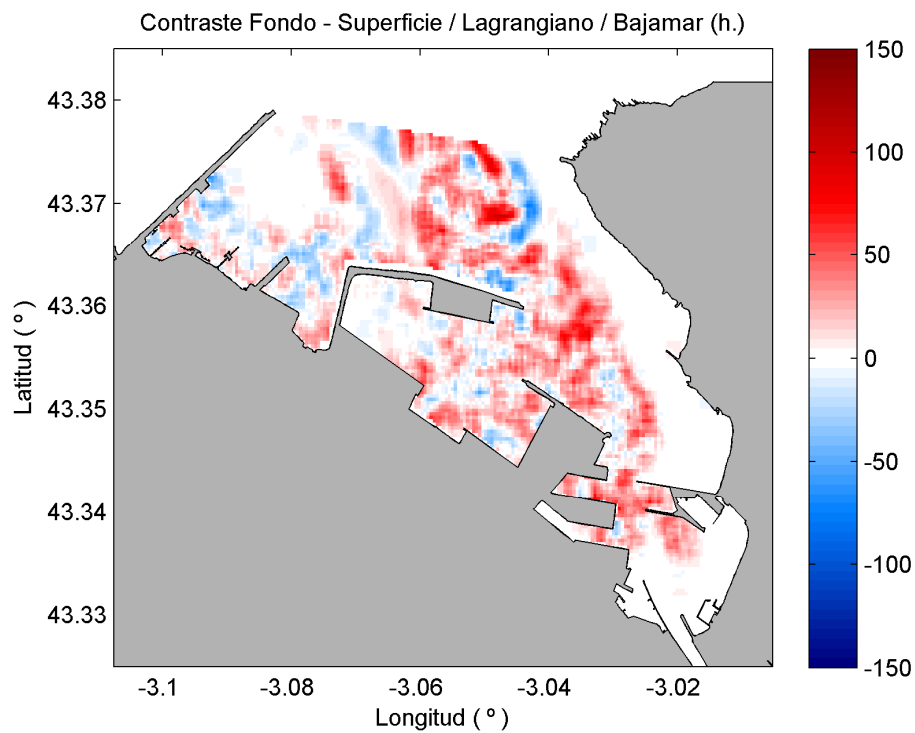


Figura 5.26: Diferencia (en horas) de los tiempos de residencia lagrangianos entre el fondo y la superficie asociados a la fase de marea bajamar

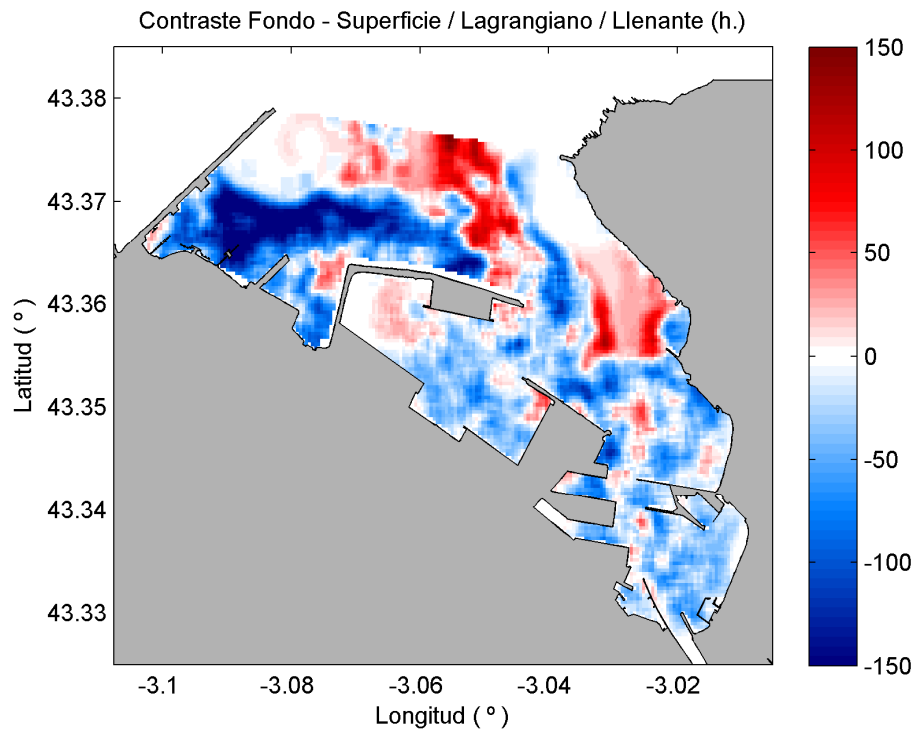


Figura 5.27: Diferencia (en horas) de los tiempos de residencia lagrangianos entre el fondo y la superficie asociados a la fase de marea llenante

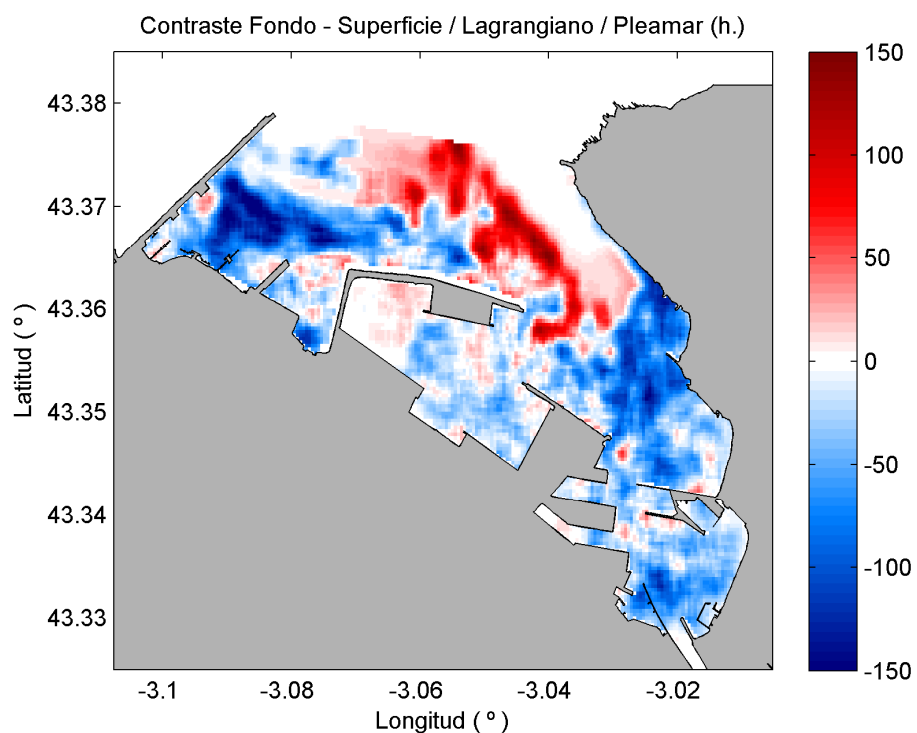


Figura 5.28: Diferencia (en horas) de los tiempos de residencia lagrangianos entre el fondo y la superficie asociados a la fase de marea pleamar

6 DISCUSIÓN

6.1 DIFERENCIAS ENTRE TrE y TrL

En este apartado se contrastan de forma directa los tiempos de residencia que resultan del cálculo euleriano con los que derivan del lagrangiano. Las diferencias son considerables.

En el [anejo 1](#), se muestra la distribución espacial de la diferencia entre tiempos de residencia eulerianos y lagrangianos. En todas las fases se han obtenido de forma generalizada TrL mayores que los TrE, cuya diferencia puede llegar a alcanzar las 200 horas. Es el caso del abra exterior, donde en las 4 fases las diferencias son máximas.

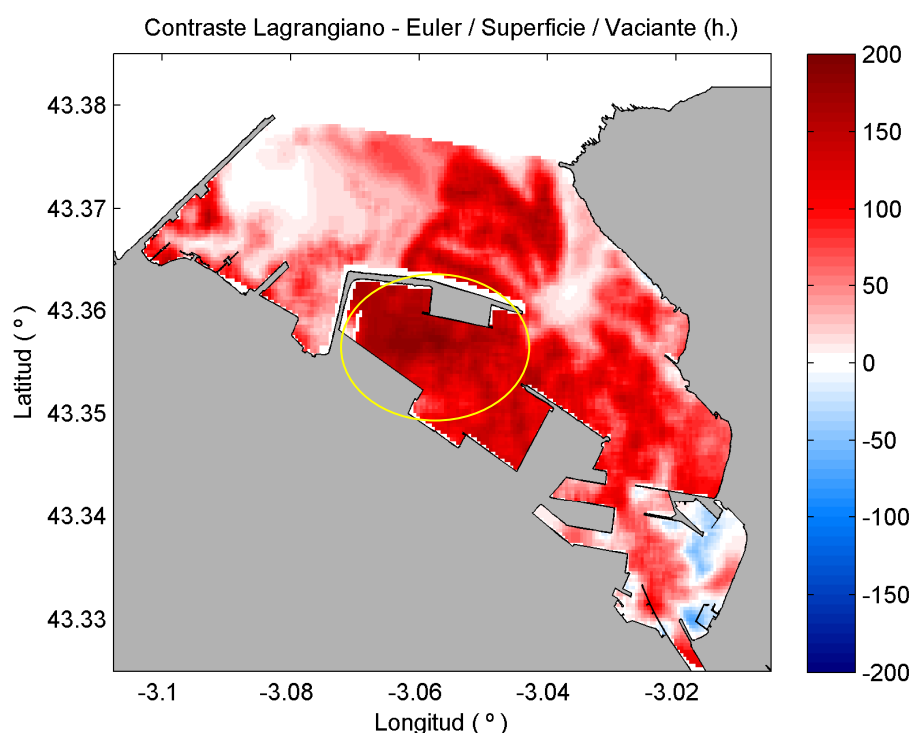


Figura 6.1: Distribución espacial de la diferencia temporal en el fondo entre el método euleriano y lagrangiano con la fase de marea vaciante como inicio de la simulación. En las 4 fases de marea, tanto en fondo como en superficie, el abra exterior, redondeada en amarillo, presenta diferencias máximas.

Teniendo en cuenta que por motivos de coste computacional para los cálculos lagrangianos hemos prescindido de la componente difusiva del transporte, podemos intuir que las mayores divergencias se darán en las zonas donde esta componente es mayor y consecuentemente donde disminuye la interferencia de la componente advectiva.

Si para simplificar nos centramos en el escenario de fase vaciante y superficie, los tiempos promedios en el abra exterior son:

Tiempo de residencia promedio en el abra exterior. Fase de marea vaciante. Superficie.

TrE	40 h.
TrL	210 h.

Tabla 6.1: Tiempo de residencia promedio en el abra exterior. Fase de marea vaciante. Superficie.

Las 40 horas de promedio del cálculo euleriano contrastan con las 210 horas del segundo, lo que nos lleva a una diferencia de 170 horas. En las Figura 6.2 y Figura 6.3 se muestran las trayectorias caóticas de una misma partícula en superficie y en profundidad en el dominio del abra exterior:

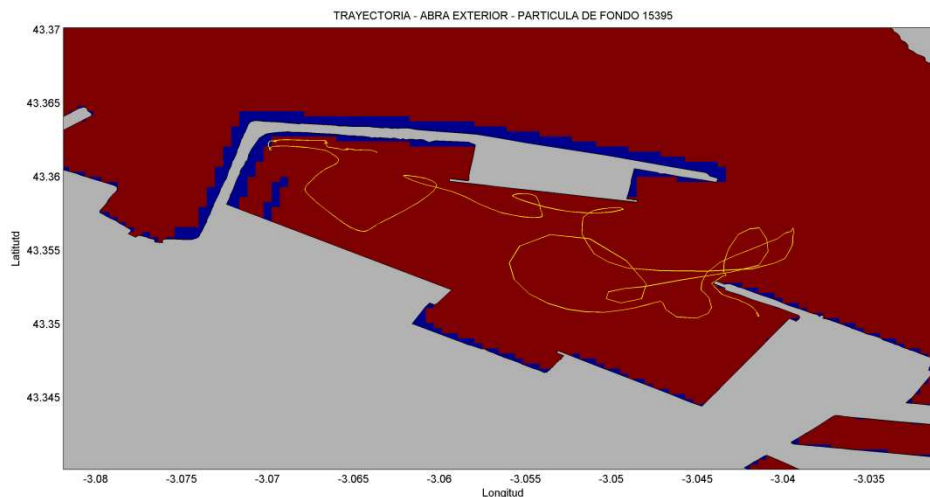


Figura 6.2: Trayectoria en el abra exterior de una partícula en el fondo

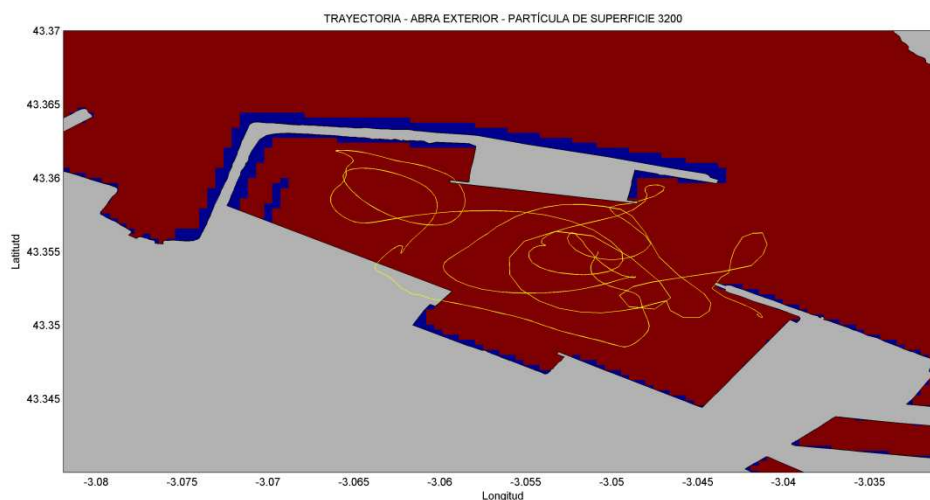


Figura 6.3: Trayectoria en el abra exterior de una partícula en la superficie

Las trayectorias de tipo caótico obtenidas para el cálculo lagrangiano de las partículas presentes en el abra exterior pueden deberse, en parte, a la presencia de un campo de velocidades de intensidad baja o, lo que es lo mismo, a una elevada proporción de procesos difusivos en detrimento de los advectivos. De forma general, esto ocurre en aquellas zonas en las que presumiblemente el transporte difusivo predomina.

Contrariamente, la zona de canal presenta las menores diferencias entre TrE y TrL . Si se observan los campos de corrientes incluidos en el [anejo 2](#), podremos localizar en la zona de

canal los mayores valores de la intensidad de las corrientes por lo que se tratara de una zona donde el transporte es principalmente advectivo:

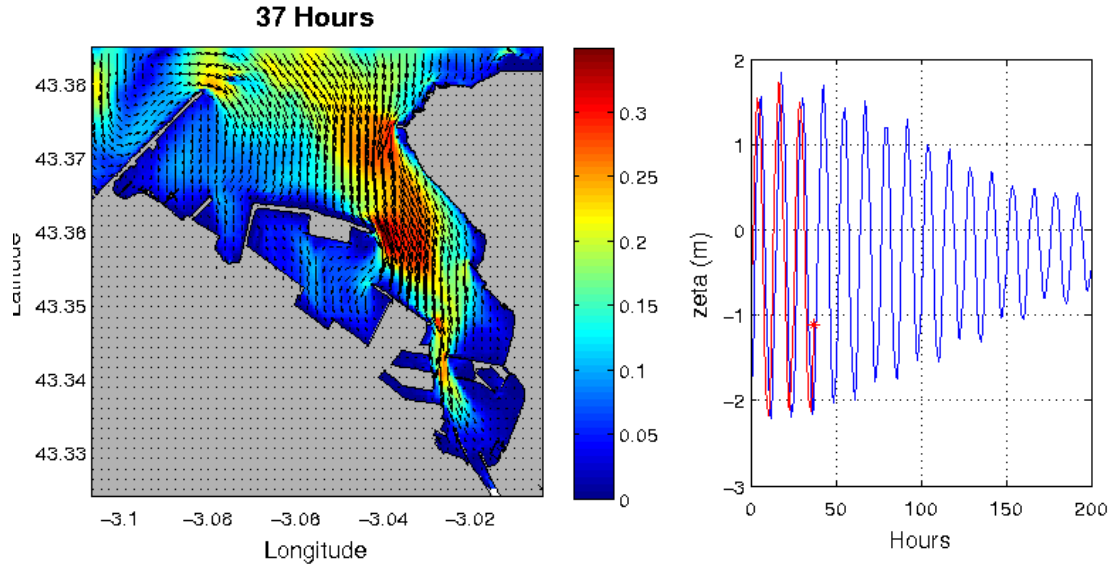


Figura 6.4: Campo de corrientes en la hora 37 de simulación

Por otro lado, los TrE presentan una evolución espacio – tiempo mucho más ordenada que los TrL. En el [anexo 3](#) puede observarse la secuencia de la evolución de la concentración (fase vaciante - superficie) empleada para el cálculo euleriano. Ésta decae de forma ordenada, empezando en la zona de intercambio de aguas y bajando hacia el abra interior. De forma análoga, en superficie tiene lugar el mismo mecanismo.

A raíz de las observaciones realizadas, desde un punto de vista cualitativo, el TrE parece ser el más representativo. El hecho de que para el cálculo de los TrL se prescindiera de los fenómenos difusivos, conlleva un sobredimensionamiento y una distorsión de los resultados. Por tanto, en las posteriores valoraciones se dará un peso mayor al análisis de los TrE.

6.2 INFLUENCIA DEL ESTADO INICIAL DE LA COMPUTACIÓN

La variabilidad en la influencia del estado inicial de la computación de los TrE no se ve prácticamente afectada por la fase de marea asociada al momento en el que se inicia la modelización de la evolución del trazador.

El cálculo del TrE (ver [Figura 5.17](#) y [Figura 5.18](#)) tan solo presenta una variabilidad espacial asociada a los diferentes fases de marea elevada en la zona de entrada al puerto, la bocana, zona de intercambio de aguas y donde presumiblemente existe una mayor

variabilidad de las corrientes dependientes de la fase de marea. En dicha zona, el Cv promedio ronda un valor comprendido entre 0.7 y 0.9 tanto para el cálculo de superficie como de fondo, perteneciendo a éste último los valores más elevados. El resto del puerto (zona de canal, abra exterior e interior) presenta una homogeneidad muy alta con valores entorno a 0.15. Dichos resultados coinciden con el comportamiento observado por Cucco (2009) en la Laguna de Venecia.

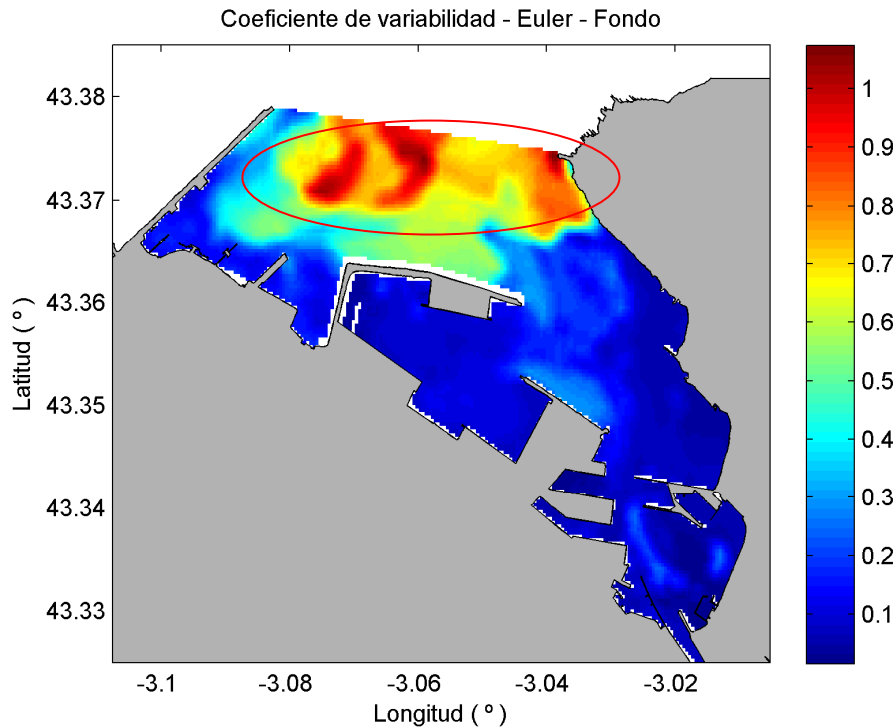


Figura 6.5: Coeficientes de variabilidad de los TrE en el fondo. Se ha redondeado la bocana, zona de intercambio de aguas en la que se alcanzan valores de variabilidad máximos tanto en el fondo como en la superficie.

Los TrL se ven fuertemente afectados por el instante de marea en el que se inicia la modelización de la evolución de las partículas.

Las mayores variaciones de los tiempos de residencia debidas a la variabilidad de marea se han encontrado en las áreas cercanas a la bocana. Sin embargo, la variabilidad de los TrL (ver Figura 5.19 y Figura 5.20) se concentra no solo en estas zonas sino también a lo largo de la zona de canal con un valor promedio de 0.5. En la bocana, la dispersión de los resultados se dispara de forma relevante para los tiempos de superficie, obteniéndose un valor promedio de 0.9, el cual contrasta con los 0.6 obtenidos en fondo. Allí, una pequeña zona alcanza los valores máximos de variabilidad tanto en superficie como en profundidad:

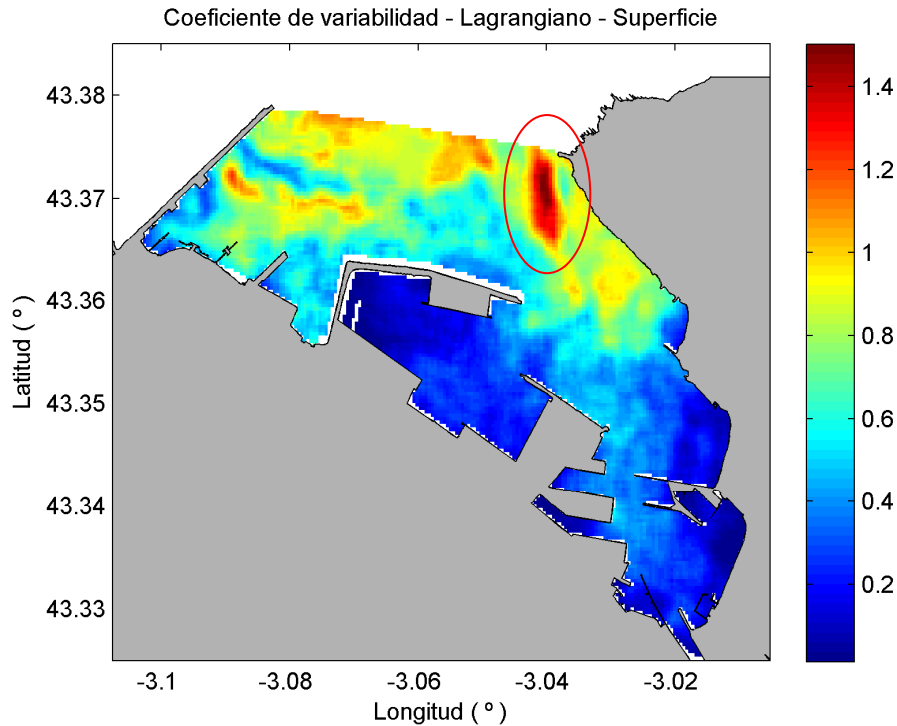


Figura 6.6: Coeficientes de variabilidad de los TrL en superficie. Se ha redondeado el área en la que se alcanzan valores de variabilidad máximos tanto en fondo como en superficie.

En términos generales, los tiempos de residencia eulerianos calculados para el fondo parecen estar sensiblemente menos influenciados por la fase de marea inicia, a excepción de algunas pequeñas áreas en la bocana, donde el comportamiento es el inverso. En referencia a los TrL, el estudio en superficie presenta una variabilidad mucho más elevada en la zona dominada por el intercambio de aguas y parecida en el resto del dominio.

6.3 DIFERENCIAS ENTRE FONDO Y SUPERFICIE

6.3.1 Cálculo euleriano

En el fondo los TrE presentan valores mayores que en la superficie. Esta condición se extiende a lo largo de todo el dominio y se acentúa de forma gradual a medida que las aguas se adentran en el puerto, alcanzando valores máximos en el abra interior (ver [Figura 6.7](#)). La explicación de lo anterior podría deberse por la mayor difusión que el viento produce en superficie y no en el fondo.

La parte más protegida del abra exterior y el eje central de la zona de canal también experimentan valores máximos. En la siguiente figura se han numerado las tres zonas más susceptibles de sufrir variaciones en profundidad:

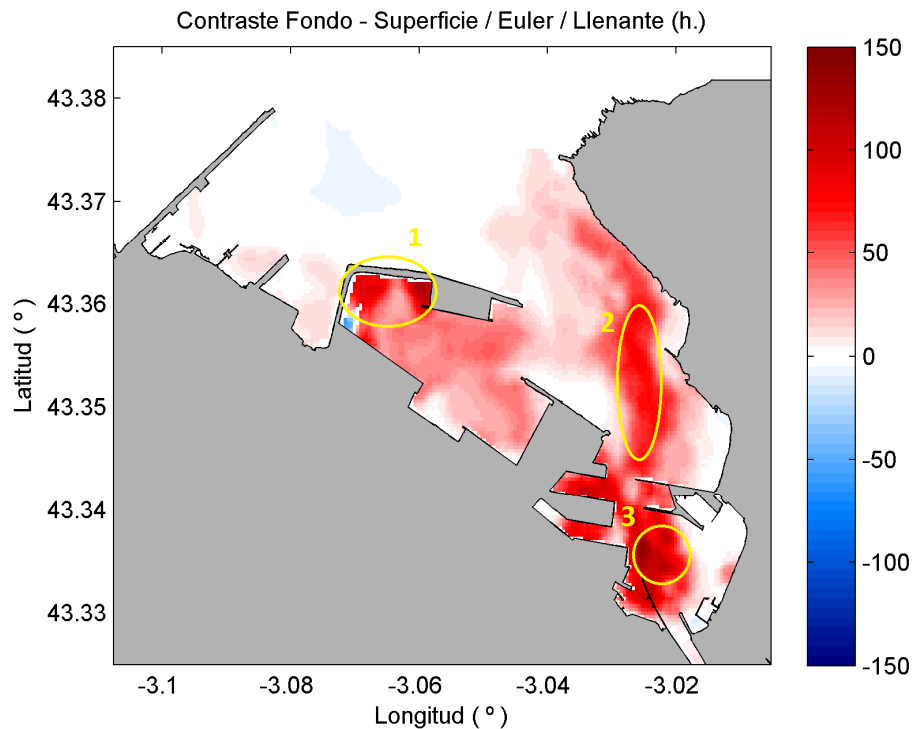


Figura 6.7: Zonas en las que se alcanzan mayores diferencias de los TrE entre fondo y superficie en la fase de marea llenante: 1) EL área más refugiada del abra exterior. 2) Eje central de la zona de canal. 3) Abra interior

En la Tabla 6.2 se recogen las máximas diferencias alcanzadas entre fondo y superficie de los TrE asociados a las cuatro fases de marea:

FASE DE MAREA	DIFERENCIA
Vaciante	151 h.
Bajamar	150 h.
Llenante	180 h.
Pleamar	184 h.

Tabla 6.2: Máximas diferencias entre los TrE obtenidos en el fondo y en la superficie.

Se aprecia un salto significativo de 30 horas de las máximas diferencias en las fases de llenante y pleamar.

En las cuatro fases también se aprecian tres pequeñas áreas en las que se han obtenido tiempos en superficie mayores que en profundidad (ver [Figura 6.8](#)). Sin embargo estos fenómenos pueden considerarse como pequeños y aislados:

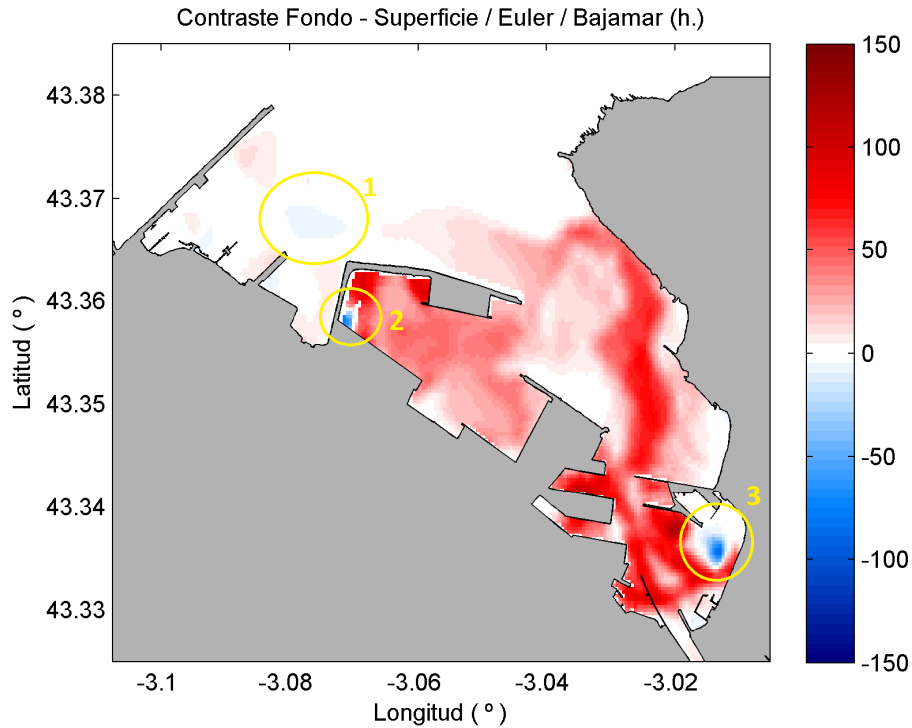


Figura 6.8: Zonas en las que de forma anómala se obtienen tiempos de residencia eulerianos mayores en superficie que en profundidad. Fase de marea bajamar.

6.3.2 Cálculo lagrangiano

Contrariamente a los TrE, los tiempos de residencia lagrangianos no alcanzan valores mayores en el fondo de forma generalizada. Los TrL presentan dos patrones claramente diferenciados. Como puede verse en la Figura 6.9, para las fases de marea vaciante y bajamar se alternan zonas en las que en el fondo se obtienen valores mayores que en superficie y viceversa.

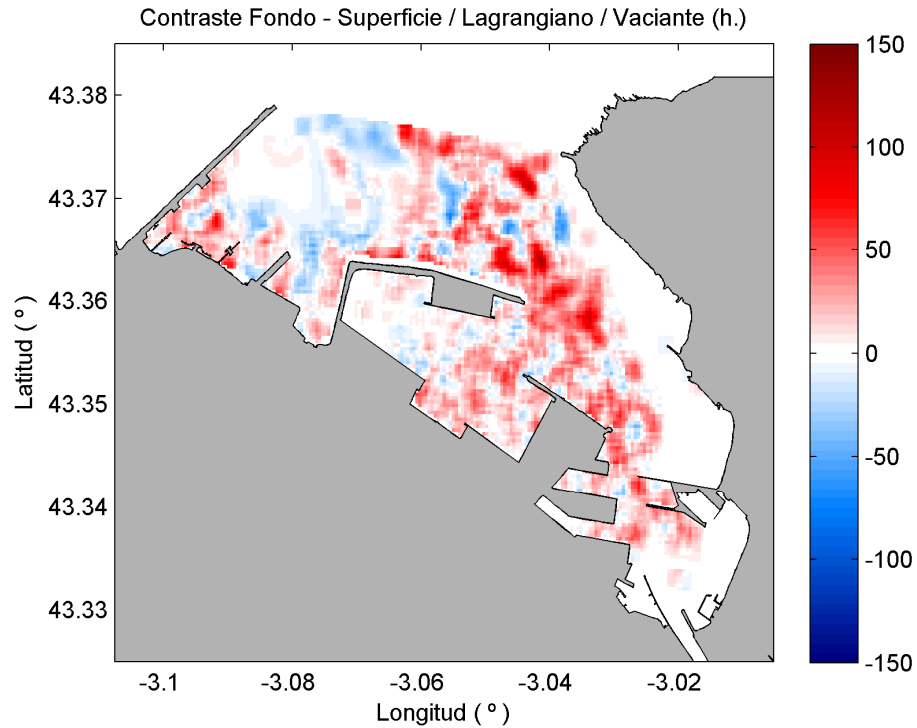


Figura 6.9: Diferencia de los TrL entre fondo y superficie para la fase de marea vaciante. Para el escenario en bajamar la configuración es parecida.

Por el contrario, en las fases de marea llenante y pleamar, en la zona cercana a la bocana se dan TrL mayores en profundidad mientras que en el resto del dominio estos tienen lugar en la superficie:

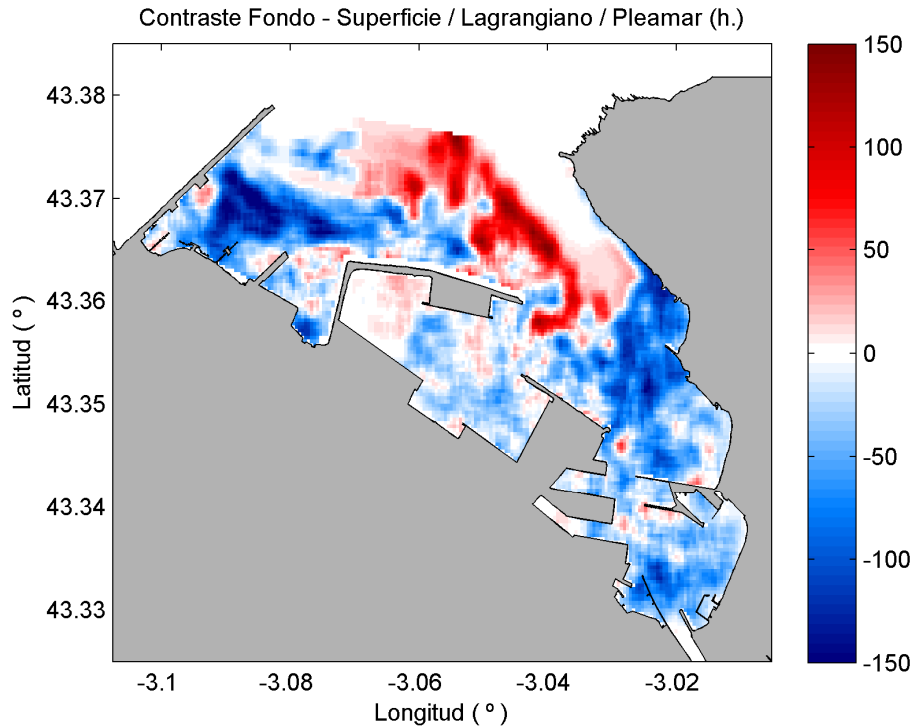


Figura 6.10: Diferencia de los TrL entre fondo y superficie para la fase de marea pleamar. Para el escenario en llenante la configuración es parecida.

La explicación a este comportamiento la tendría la ausencia de efectos de tipo difusivo. La presencia en las fases de llenante y pleamar de campos de corriente claramente superiores a lo largo de todo el dominio, podría justificar la distribución más ordenada en éstas que la de las fases de marea vaciante y bajamar.

7 CONCLUSIONES

En este trabajo se han obtenido y comparado los tiempos de residencia calculados mediante métodos eulerianos (TrE) y lagrangianos (TrL). Para ello, se ha utilizado el campo de corrientes del Puerto de Bilbao obtenido con el modelo de simulación ROMS. El objetivo principal del trabajo ha sido evaluar las diferencias entre las dos metodologías de obtención de tiempos de residencia, así como la comparación entre los valores obtenidos en fondo y superficie. También se ha analizado la influencia del instante inicial del cálculo respecto la fase de marea en los tiempos de residencia.

Para el cálculo lagrangiano de las partículas se ha prescindido de los fenómenos difusivos del transporte debido al elevado coste computacional que ello acarrearía. Por el contrario, el cálculo euleriano de las trazas ha incluido tanto la componente advectiva como la difusiva del transporte.

En consecuencia, desde un punto de vista cualitativo, el TrE parece ser el más representativo. El hecho de que para el cálculo de los TrL se prescindiera de los fenómenos difusivos, conlleva un sobredimensionamiento y una distorsión de los resultados. Las trayectorias de tipo caótico obtenidas para el cálculo lagrangiano pueden deberse, en parte, a

la presencia de un campo de velocidades de intensidad baja o, lo que es lo mismo, a una elevada proporción de procesos difusivos en detrimento de los advectivos. De forma general, esto ocurre en aquellas zonas en las que presumiblemente el transporte difusivo es predominante.

A raíz de los resultados se ha apreciado que el TrE no se ve tan afectado por la fase de marea asociada al momento en el que se inicia la modelización de la evolución del trazador como los TrL. A su vez, éstos últimos parecen estar sensiblemente menos influenciados por la fase de marea inicial en el fondo, a excepción de algunas pequeñas lagunas en la bocana. Por el contrario, los TrL se ven fuertemente afectados por la variabilidad del instante inicial de la marea, donde en superficie y en la zona de bocana, las variaciones son máximas.

Los TrE presentan valores mayores en fondo que en superficie. Esta condición se extiende a lo largo de todo el dominio y se acentúa de forma gradual a medida que las aguas se adentran en el puerto, alcanzando valores máximos en el abra interior y en las zonas donde los campos de corrientes son de intensidad baja. El efecto mezclador del viento en la superficie puede propiciar en parte estas diferencias en profundidad.

Contrariamente, los TrL no presentan un patrón definido en la comparación fondo – superficie. Estos presentan un comportamiento caótico debido probablemente a la dependencia de la presencia de fenómenos de transporte mayormente advectivos. Una vez más, los tiempos de residencia eulerianos se antojan como el parámetro más representativo de los procesos existentes en el Puerto de Bilbao. Además, el hecho de que la aproximación euleriana no sea tan susceptible al instante inicial de computación garantiza una solución más sencilla para el cálculo de las corrientes y sus fenómenos asociados, lo que le confiere la posibilidad de describir fenómenos a largo plazo en el Puerto de Bilbao.

8 REFERENCIAS

8.1 BIBLIOGRAFÍA

Abdelrhman, M.A., 2005. *"Simplified modeling of flushing and residence times in 42 embayments in New England, USA, with special attention to Greenwich Bay, Rhode Island"*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 62, pp. 339–351.

Abdelrhman, M.A., 2002. *"A method to incorporate ecology into residence time: Local Effect Time (LET)"*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, submitted for publication.

Asselin, S., Spaulding, M.L., 1993. *"Flushing times for the Providence River based on tracer experiments"*. *Estuaries* 6 (4), pp. 830–839.

Bolin, B., Rodhe, H., 1973. *"A note on the concept of age distribution and transit time in natural reservoirs"*. *Tellus* 25 (1), pp. 58–62.

Cucco, A., Umgiesser, G., Ferrarin, C., Perilli, A., Melaku, D., Solidoro, C., 2009. *"Eulerian and lagrangian transport time scales of a tidal active coastal basin"*. *Ecological Modelling* 220, pp. 913–922.

- Cucco, A., Umgiesser, G., 2006. « Modeling the Venice lagoon water residence time ». *Ecological Modeling* 193, pp. 34 – 51.
- Deleersnijder, E., Delhez, E.J.M., 2007. "Timescale- and tracer-based methods for understanding the results of complex marine models." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74 v-vii.
- Delhez, E.J.M., Deleersnijder, E., Rixen, M., 2004. "Tracer methods in geophysical fluid dynamics". *Journal of Marine Systems* 48, pp. 1 – 193.
- Dimou, K., Adams, E., 1990. "2-D particle tracking model for estuarine mixing". *Proc. ASCE Estuarine and Coastal Modeling Conference, Newport, USA*.
- England, M.H., Maier-Reimer, E., 2001. "Using chemical tracers to assess ocean models". *Reviews of Geophysics* 39, pp. 29 – 70.
- Glass, J., Rodi, W., 1982. "A higher order numerical scheme for scalar transport". *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng* 31, pp. 337 – 358.
- González, M., Uriarte, Ad., Fontán, A., Mader, J., Gyssels, P., 2004. "Oceanography and Marine Environment of the Basque Country". *Elsevier Oceanography Series n° 70*. Elsevier, Amsterdam, pp. 133–157.
- Grifoll, M., Fontán, A., Ferrer, L., Mader, J., González, M., Espino, M., 2009. "3D hydrodynamic characterisation of a meso-tidal harbour: The case of Bilbao (northern Spain)". *Coastal Engineering* 56, pp. 907-918.
- Jørgensen, E., 2001. "The application of models to find the relevance of residence time in lake and reservoir management"
- Large, W.G., McWilliams, J.C., Donay, S.C., 1994. "Oceanic vertical mixing: a review and a model with a non local boundary layer parametrization". *Rev. Geophys.* 32 (4), pp. 363–403.
- Mestres, M., 2002. "Three-dimensional simulation of pollutant dispersion in coastal waters". *Tesis doctoral. UPC. Capítulo 5*.
- Miller, R.L., McPherson, B.F., 1991. "Estimating estuarine flushing and residence times in Charlot Harbor, Florida, via salt balance and box model". *Limnology and Oceanography* 36 (3), pp. 602–612.
- Monsen, N.E., Cloern, J.E., Lucas, L.V., 2002. "A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales". *Limnology and Oceanography* 47 (5), pp. 1545–1553.
- Neuman, J. von., 1955. "Method in the Physical Sciences". *The Unity of Knowledge*, pp. 158.
- Shchepetkin, A.F., McWilliams, J.C., 2005. "The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography – following - coordinate oceanic model". *Ocean Model.* 9, pp. 347–404.

Smagorinsky, J., 1963. "General circulation experiments with the primitive equations". *Mon. Weather Rev.* 91, pp. 99–164.

Svendsen, L.A., 1984. "Wave heights and set-up in a surfzone". *Coast. Eng.* 8 (4), pp. 303–329.

Takeoka, H., 1984. "Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea". *Continental Shelf Research* 3 (3), pp. 311–326.

Usabiaga, J.I., Aguirre, J.S., Valencia, V., Borja, A., 2004. "Climate and meteorology: variability and its influence on the Ocean". *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country, Elsevier Oceanography Series n° 70*. Elsevier, Amsterdam, pp. 160–194.

Valencia, V., Franco, J., Borja, A., Fontán, A., 2004. "Hydrography of the southeastern Bay of Biscay". *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country, Elsevier Oceanography Series n° 70*. Elsevier, Amsterdam, pp. 160–194.

Zimmerman, J.T.F., 1988. "Estuarine residence times". In: Kjerfve, B. (Ed.), *Hydrodynamics of Estuaries*, vol. 1. CRC Press, pp. 75–84.

8.2 WEBGRAFÍA

www.myroms.org

www.bilbaoport.es

www.brest.ird.fr

<http://cybereuskadi.com/>

ANEJOS

ANEJO 1

Distribución espacial de la diferencia entre tiempos de residencia eulerianos y lagrangianos

ÍNDICE

FIGURA 1.1: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DIFERENCIA TEMPORAL ENTRE EL MÉTODO EULERIANO Y LAGRANGIANO EN EL FONDO CON FASE DE MAREA VACIANTE EN EL INICIO DE LA SIMULACIÓN	1
FIGURA 1.2: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DIFERENCIA TEMPORAL ENTRE EL MÉTODO EULERIANO Y LAGRANGIANO EN EL FONDO CON FASE DE MAREA BAJAMAR EN EL INICIO DE LA SIMULACIÓN	1
FIGURA 1.3: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DIFERENCIA TEMPORAL ENTRE EL MÉTODO EULERIANO Y LAGRANGIANO EN EL FONDO CON FASE DE MAREA LLENANTE EN EL INICIO DE LA SIMULACIÓN.....	2
FIGURA 1.4: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DIFERENCIA TEMPORAL ENTRE EL MÉTODO EULERIANO Y LAGRANGIANO EN EL FONDO CON FASE DE MAREA PLEAMAR EN EL INICIO DE LA SIMULACIÓN	2
FIGURA 1.5: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DIFERENCIA TEMPORAL ENTRE EL MÉTODO EULERIANO Y LAGRANGIANO EN LA SUPERFICIE CON FASE DE MAREA VACIANTE EN EL INICIO DE LA SIMULACIÓN	3
FIGURA 1.6: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DIFERENCIA TEMPORAL ENTRE EL MÉTODO EULERIANO Y LAGRANGIANO EN LA SUPERFICIE CON FASE DE MAREA BAJAMAR EN EL INICIO DE LA SIMULACIÓN	3
FIGURA 1.7: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DIFERENCIA TEMPORAL ENTRE EL MÉTODO EULERIANO Y LAGRANGIANO EN LA SUPERFICIE CON FASE DE LLENANTE EN EL INICIO DE LA SIMULACIÓN	4
FIGURA 1.8: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DIFERENCIA TEMPORAL ENTRE EL MÉTODO EULERIANO Y LAGRANGIANO EN LA SUPERFICIE CON FASE DE MAREA PLEAMAR EN EL INICIO DE LA SIMULACIÓN	4

1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DIFERENCIA ENTRE TIEMPOS DE RESIDENCIA EULERIANOS Y LAGRANGIANOS

1.1 FONDO

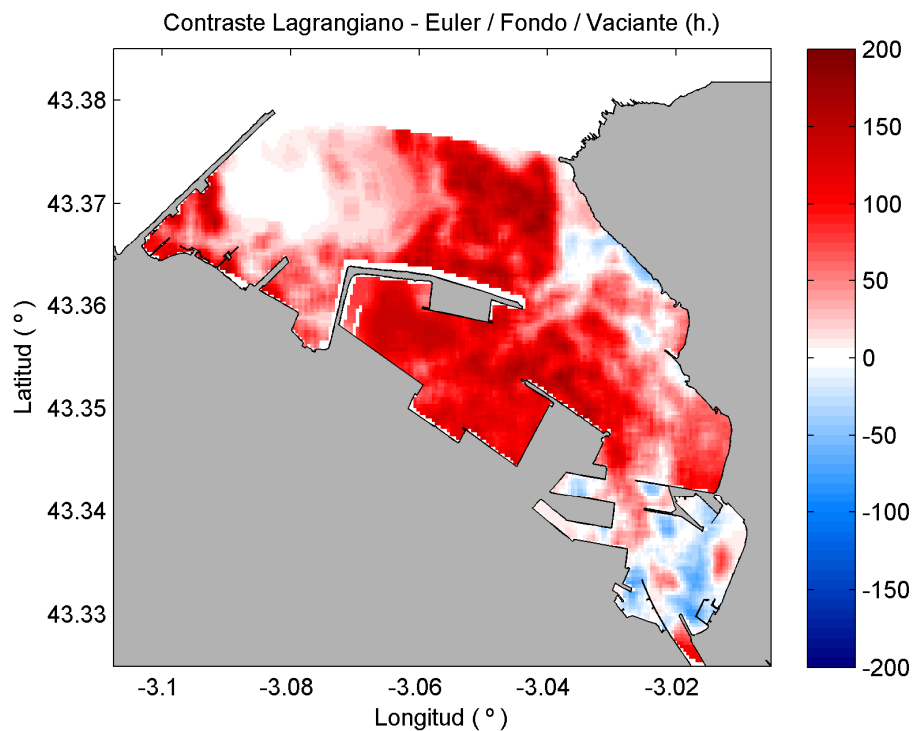


Figura 1.1: Distribución espacial de la diferencia temporal entre el método euleriano y lagrangiano en el fondo con fase de marea vaciante en el inicio de la simulación

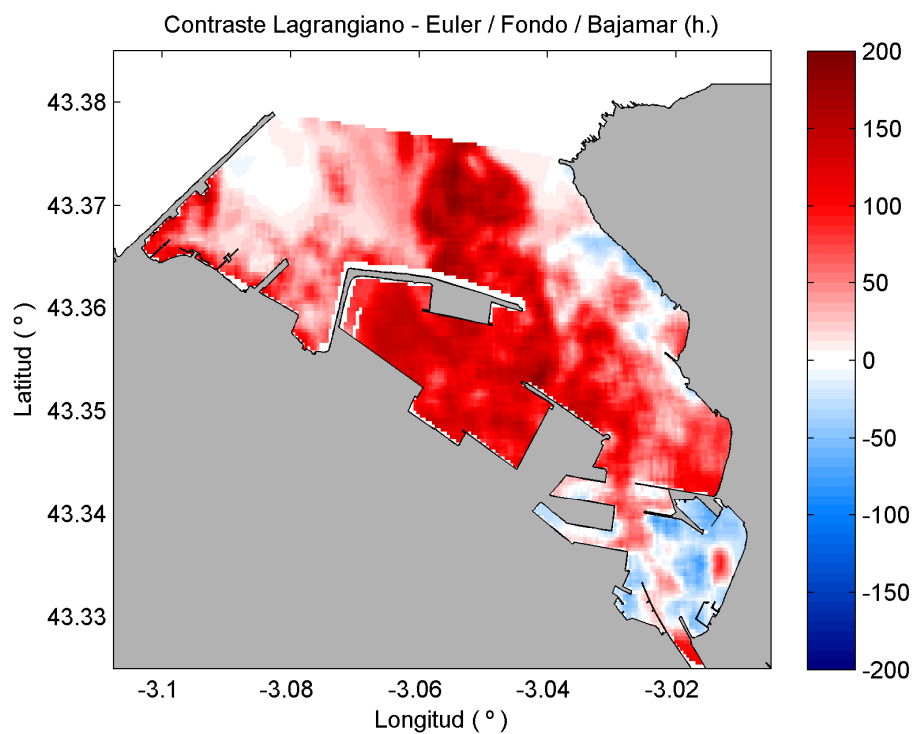


Figura 1.2: Distribución espacial de la diferencia temporal entre el método euleriano y lagrangiano en el fondo con fase de marea bajamar en el inicio de la simulación

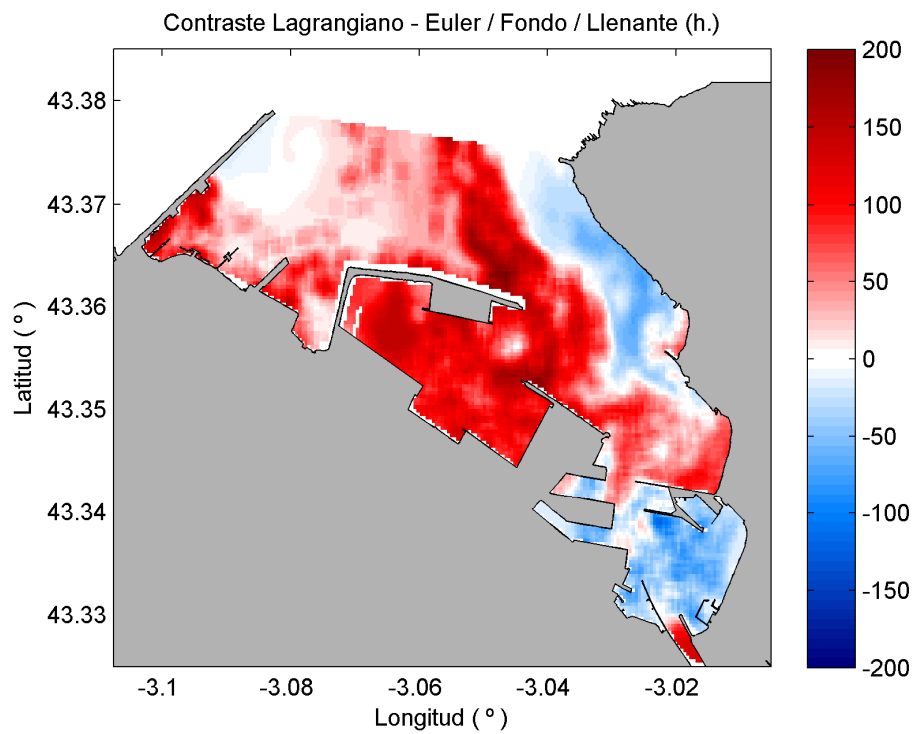


Figura 1.3: Distribución espacial de la diferencia temporal entre el método euleriano y lagrangiano en el fondo con fase de marea llenante en el inicio de la simulación

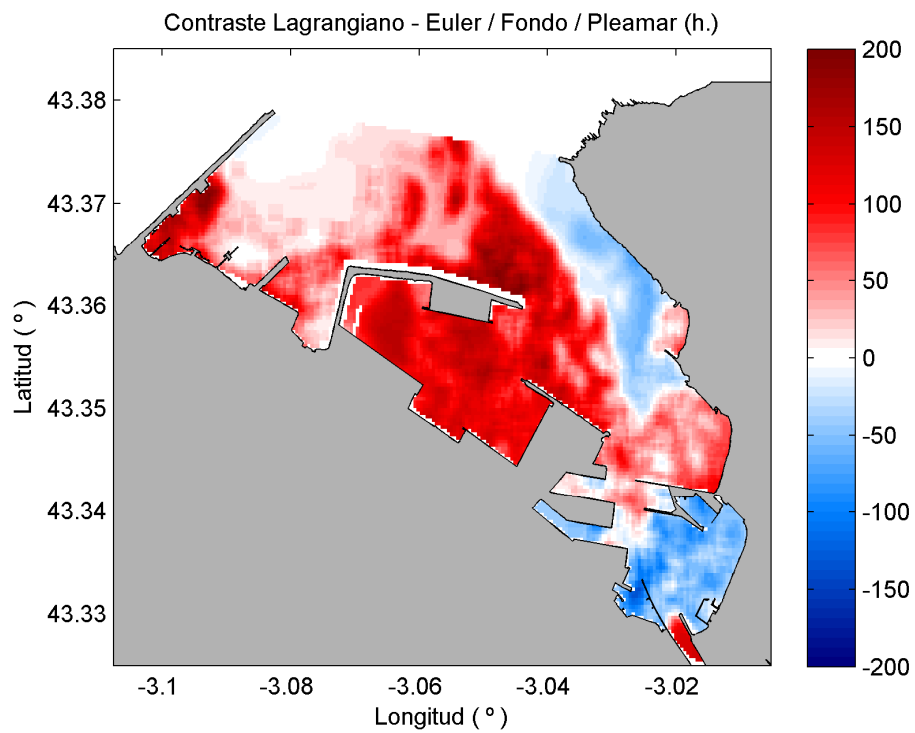


Figura 1.4: Distribución espacial de la diferencia temporal entre el método euleriano y lagrangiano en el fondo con fase de marea pleamar en el inicio de la simulación

1.2 SUPERFICIE

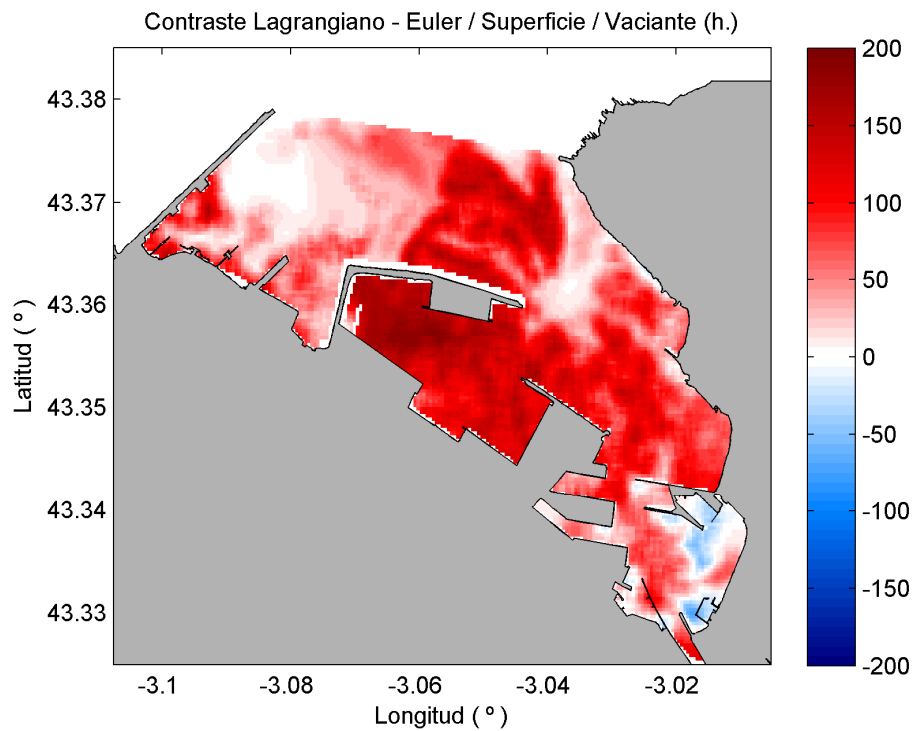


Figura 1.5: Distribución espacial de la diferencia temporal entre el método euleriano y lagrangiano en la superficie con fase de marea vaciante en el inicio de la simulación

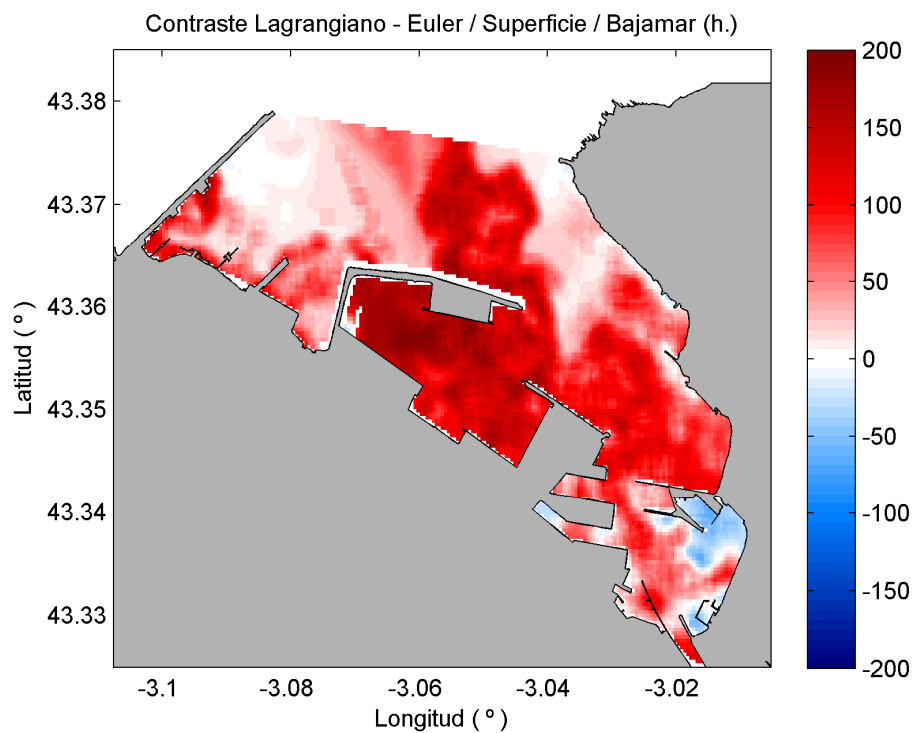


Figura 1.6: Distribución espacial de la diferencia temporal entre el método euleriano y lagrangiano en la superficie con fase de marea bajamar en el inicio de la simulación

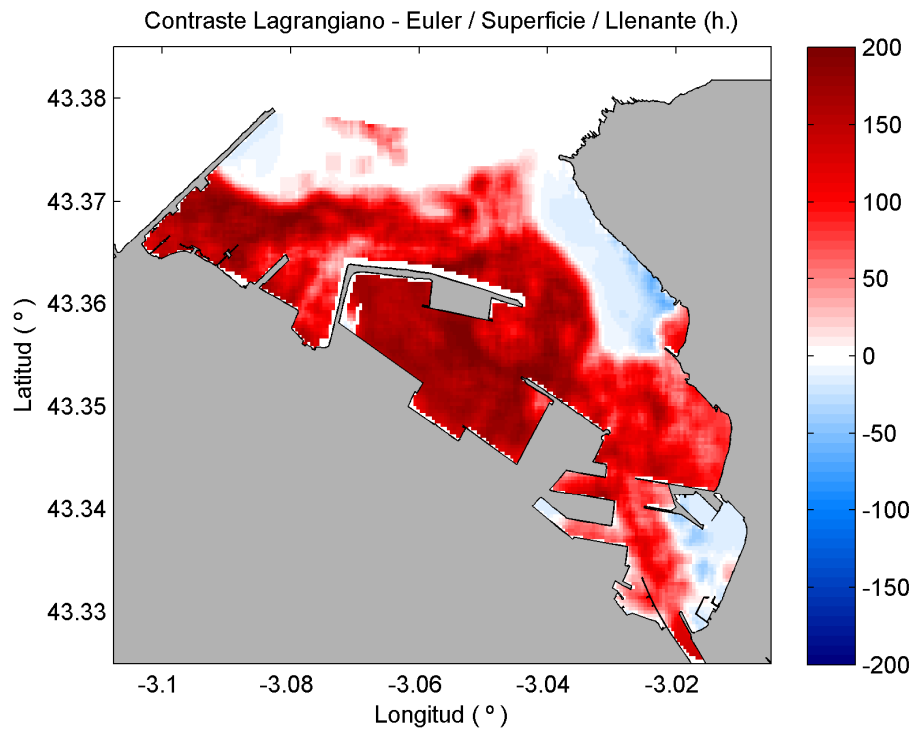


Figura 1.7: Distribución espacial de la diferencia temporal entre el método euleriano y lagrangiano en la superficie con fase de llenante en el inicio de la simulación

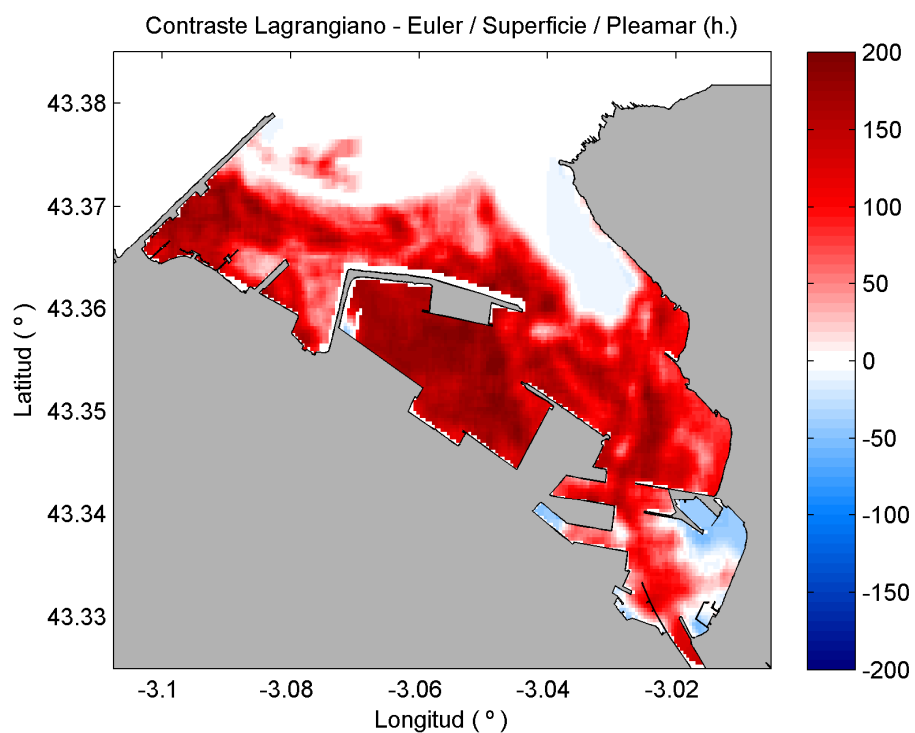


Figura 1.8: Distribución espacial de la diferencia temporal entre el método euleriano y lagrangiano en la superficie con fase de marea pleamar en el inicio de la simulación

ANEJO 2

Campo de corrientes y altura de marea asociada a cada instante.
Período de marea viva.

ÍNDICE

FIGURA 1.1: CAMPO DE CORRIENTES EXISTENTE EN LA HORA DE SIMULACIÓN 1	1
FIGURA 1.2: CAMPO DE CORRIENTES EXISTENTE EN LA HORA DE SIMULACIÓN 5	2
FIGURA 1.3: CAMPO DE CORRIENTES EXISTENTE EN LA HORA DE SIMULACIÓN 9	2
FIGURA 1.4: CAMPO DE CORRIENTES EXISTENTE EN LA HORA DE SIMULACIÓN 13	3
FIGURA 1.5: CAMPO DE CORRIENTES EXISTENTE EN LA HORA DE SIMULACIÓN 17	3
FIGURA 1.6: CAMPO DE CORRIENTES EXISTENTE EN LA HORA DE SIMULACIÓN 21	4
FIGURA 1.7: CAMPO DE CORRIENTES EXISTENTE EN LA HORA DE SIMULACIÓN 25	4
FIGURA 1.8: CAMPO DE CORRIENTES EXISTENTE EN LA HORA DE SIMULACIÓN 29	5
FIGURA 1.9: CAMPO DE CORRIENTES EXISTENTE EN LA HORA DE SIMULACIÓN 33	5
FIGURA 1.10: CAMPO DE CORRIENTES EXISTENTE EN LA HORA DE SIMULACIÓN 37	6

1 CAMPO DE CORRIENTES IMPLEMENTADO Y ALTURA DE MAREA ASOCIADA

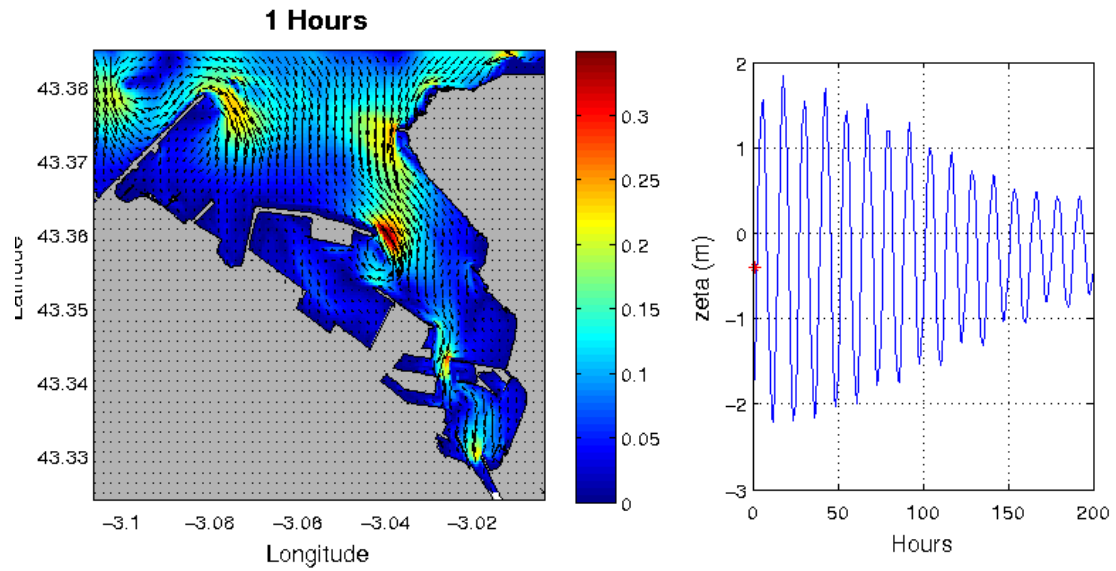


Figura 1.1: Campo de corrientes existente en la hora de simulación 1 y altura de marea asociada

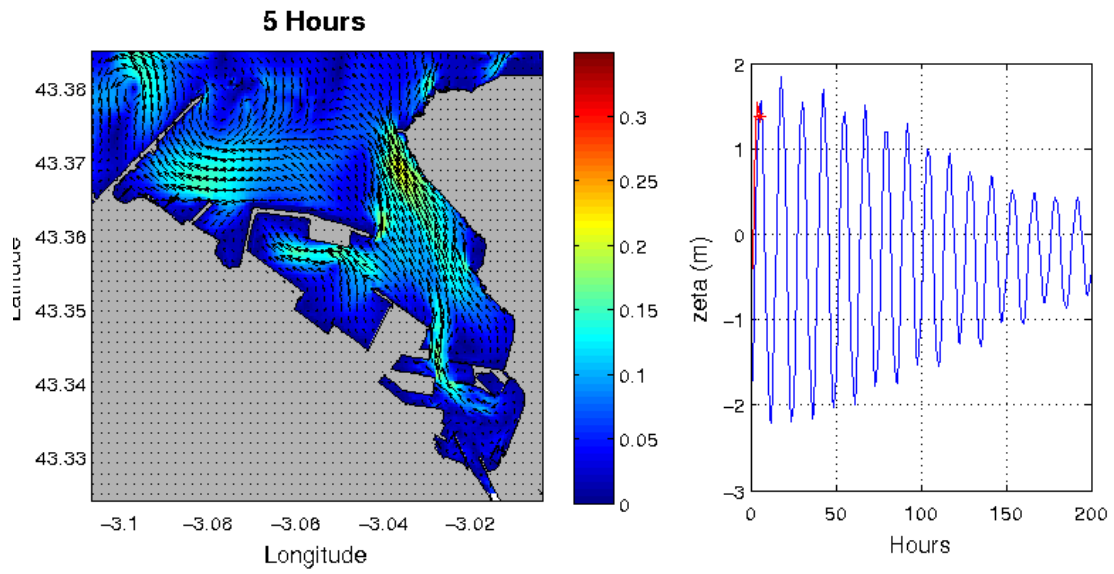


Figura 1.2: Campo de corrientes existente en la hora de simulación 5 y altura de marea asociada

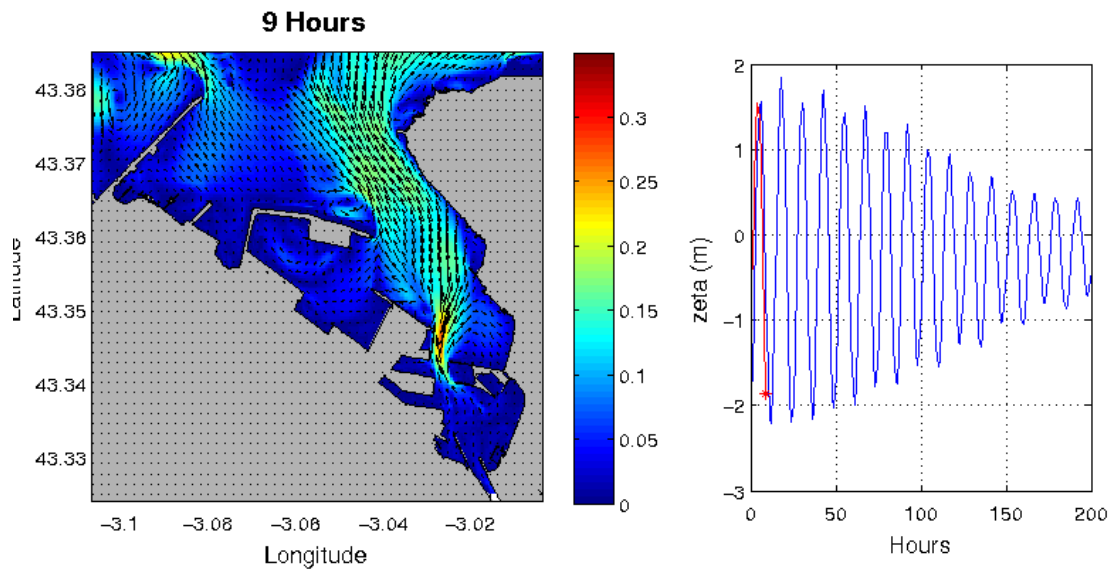


Figura 1.3: Campo de corrientes existente en la hora de simulación 9 y altura de marea asociada

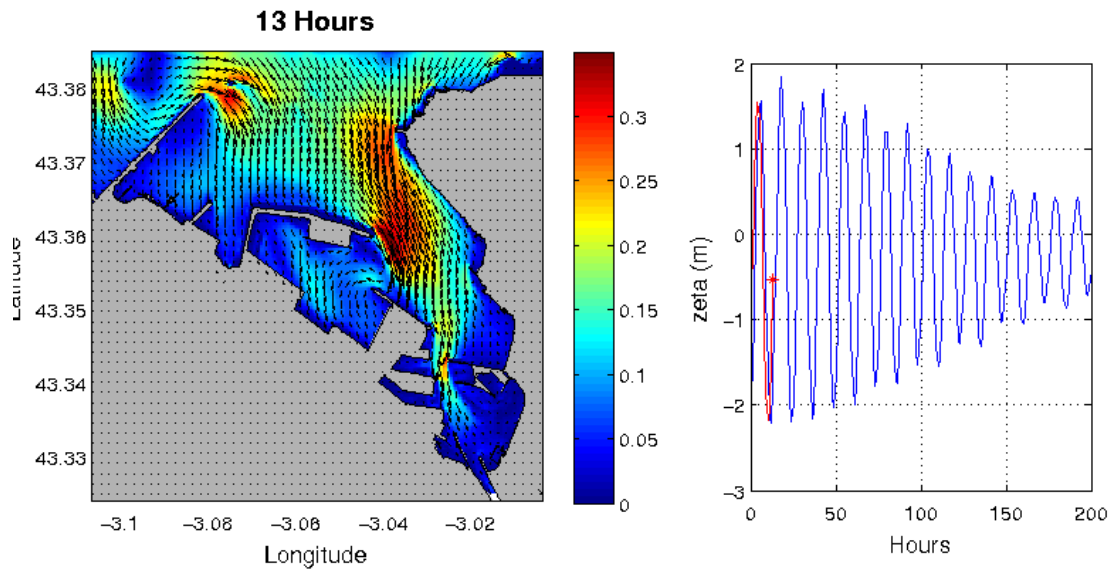


Figura 1.4: Campo de corrientes existente en la hora de simulación 13 y altura de marea asociada

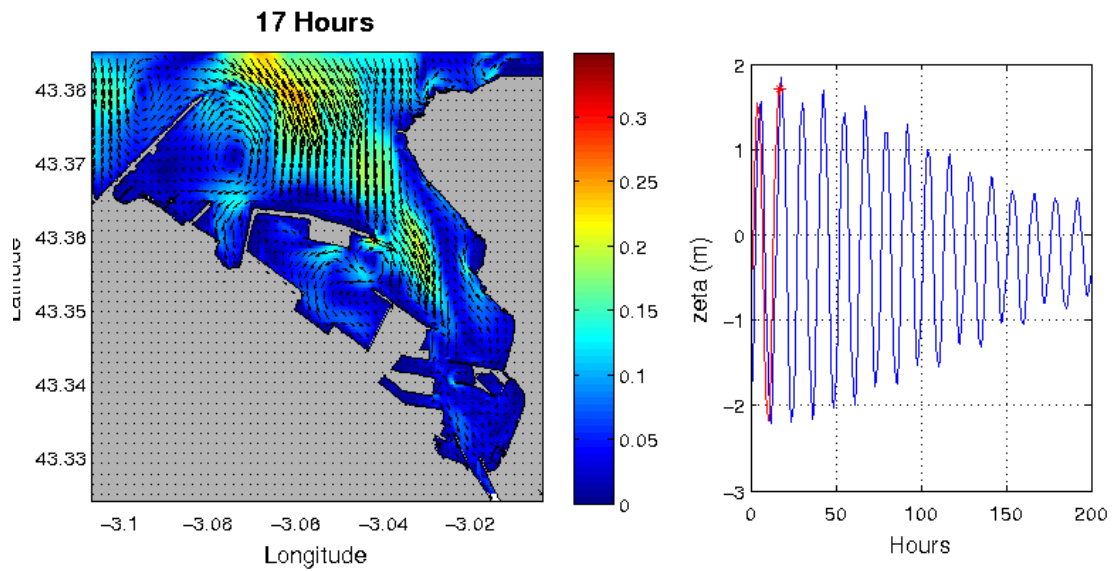


Figura 1.5: Campo de corrientes existente en la hora de simulación 17 y altura de marea asociada

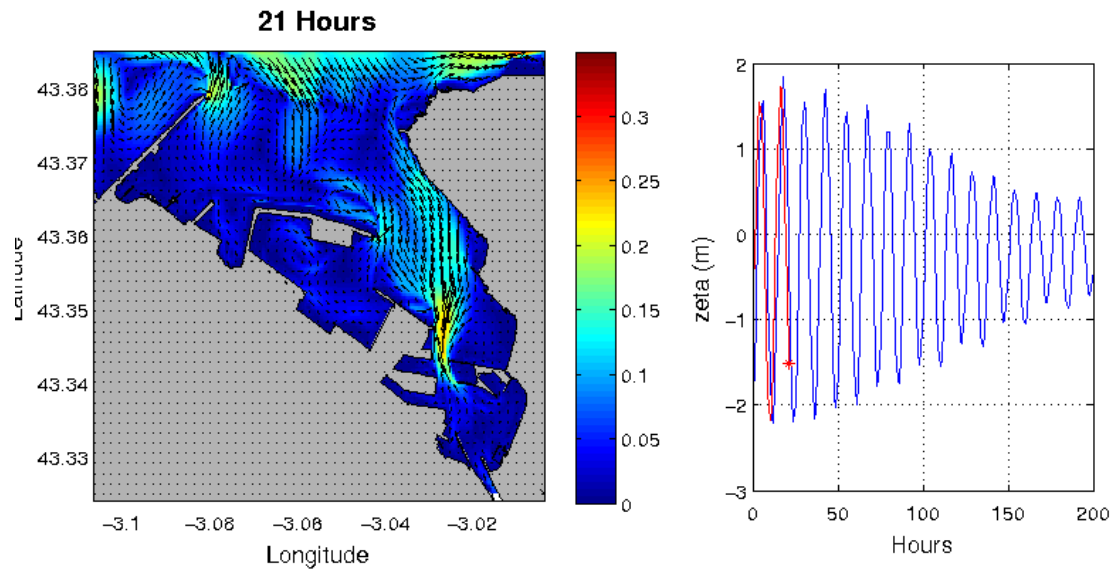


Figura 1.6: Campo de corrientes existente en la hora de simulación 21 y altura de marea asociada

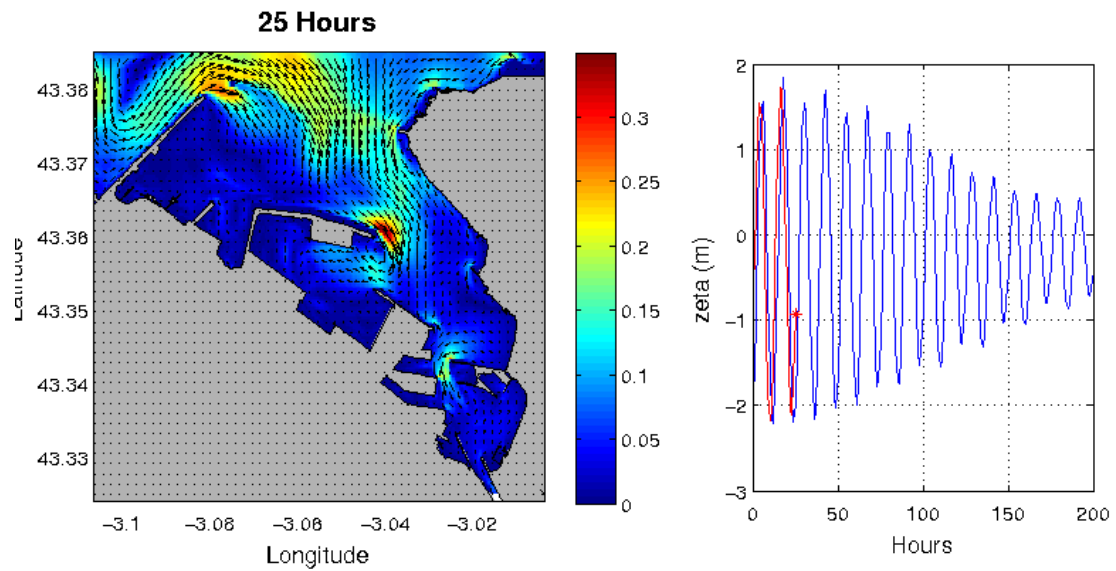


Figura 1.7: Campo de corrientes existente en la hora de simulación 25 y altura de marea asociada

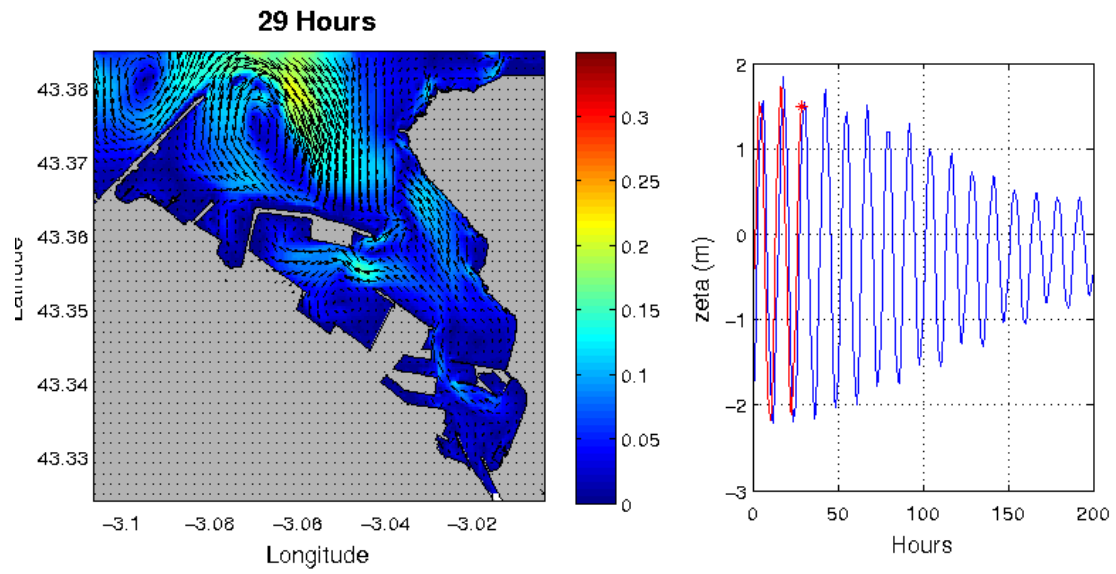


Figura 1.8: Campo de corrientes existente en la hora de simulación 29 y altura de marea asociada

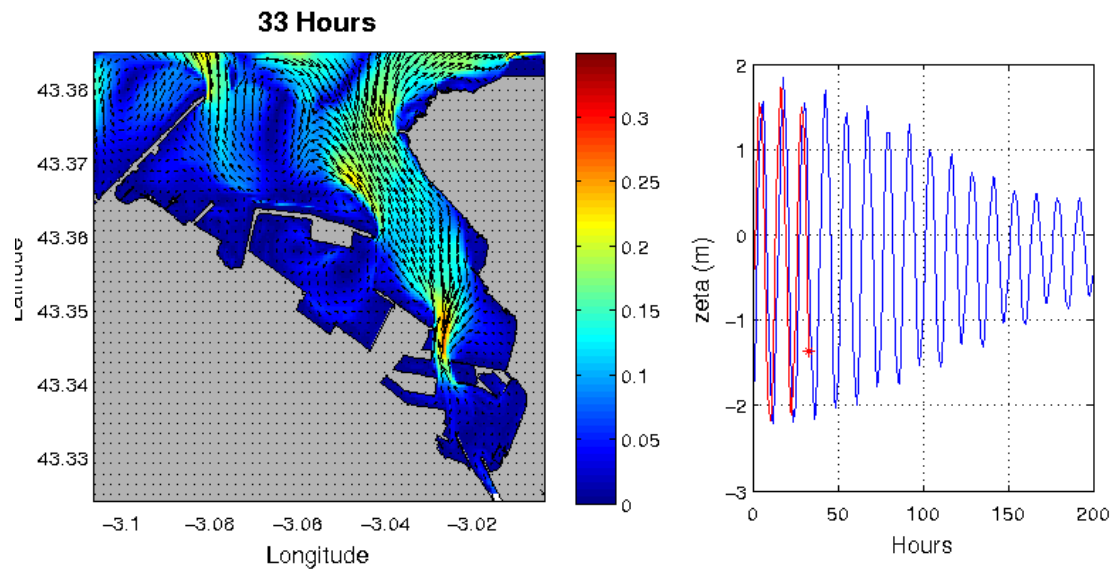


Figura 1.9: Campo de corrientes existente en la hora de simulación 33 y altura de marea asociada

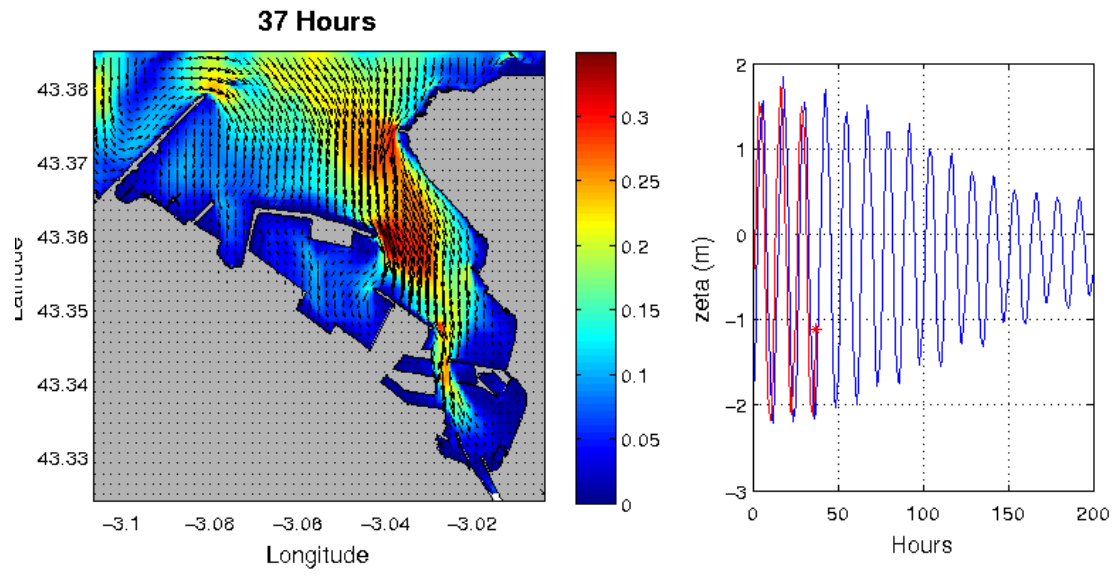


Figura 1.10: Campo de corrientes existente en la hora de simulación 37 y altura de marea asociada

ANEJO 3

Evolución de la concentración en la superficie. Inicio de la simulación asociado a la fase de marea vaciante

ÍNDICE

FIGURA 1.1: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN EN LA SUPERFICIE EN LA HORA 1. FASE DE MAREA VACIANTE ASOCIADA AL INICIO DE LA SIMULACIÓN.	1
FIGURA 1.2: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN EN LA SUPERFICIE EN LA HORA 21. FASE DE MAREA VACIANTE ASOCIADA AL INICIO DE LA SIMULACIÓN.	1
FIGURA 1.3: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN EN LA SUPERFICIE EN LA HORA 41. FASE DE MAREA VACIANTE ASOCIADA AL INICIO DE LA SIMULACIÓN.	2
FIGURA 1.4: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN EN LA SUPERFICIE EN LA HORA 61. FASE DE MAREA VACIANTE ASOCIADA AL INICIO DE LA SIMULACIÓN.	2
FIGURA 1.5: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN EN LA SUPERFICIE EN LA HORA 81. FASE DE MAREA VACIANTE ASOCIADA AL INICIO DE LA SIMULACIÓN.	3
FIGURA 1.6: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN EN LA SUPERFICIE EN LA HORA 101. FASE DE MAREA VACIANTE ASOCIADA AL INICIO DE LA SIMULACIÓN.	3
FIGURA 1.7: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN EN LA SUPERFICIE EN LA HORA 121. FASE DE MAREA VACIANTE ASOCIADA AL INICIO DE LA SIMULACIÓN.	4
FIGURA 1.8: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN EN LA SUPERFICIE EN LA HORA 141. FASE DE MAREA VACIANTE ASOCIADA AL INICIO DE LA SIMULACIÓN.	4

1 EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN LA SUPERFICIE. INICIO DE LA SIMULACIÓN ASOCIADO A LA FASE DE MAREA VACIANTE.

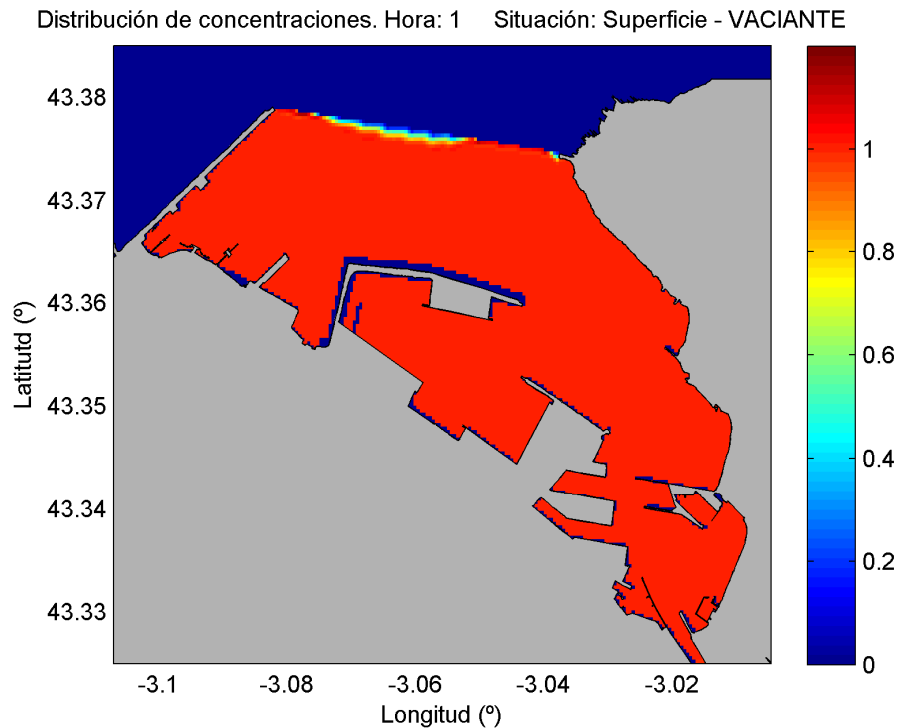


Figura 1.1: Distribución espacial de la concentración en la superficie en la hora 1. Fase de marea vaciante asociada al inicio de la simulación.

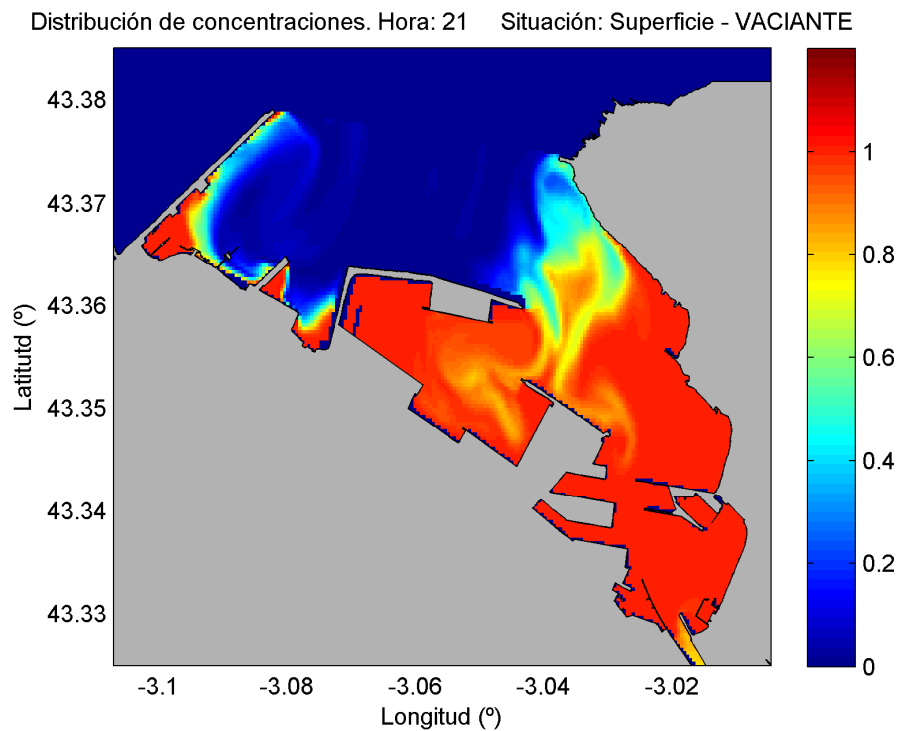


Figura 1.2: Distribución espacial de la concentración en la superficie en la hora 21. Fase de marea vaciante asociada al inicio de la simulación.

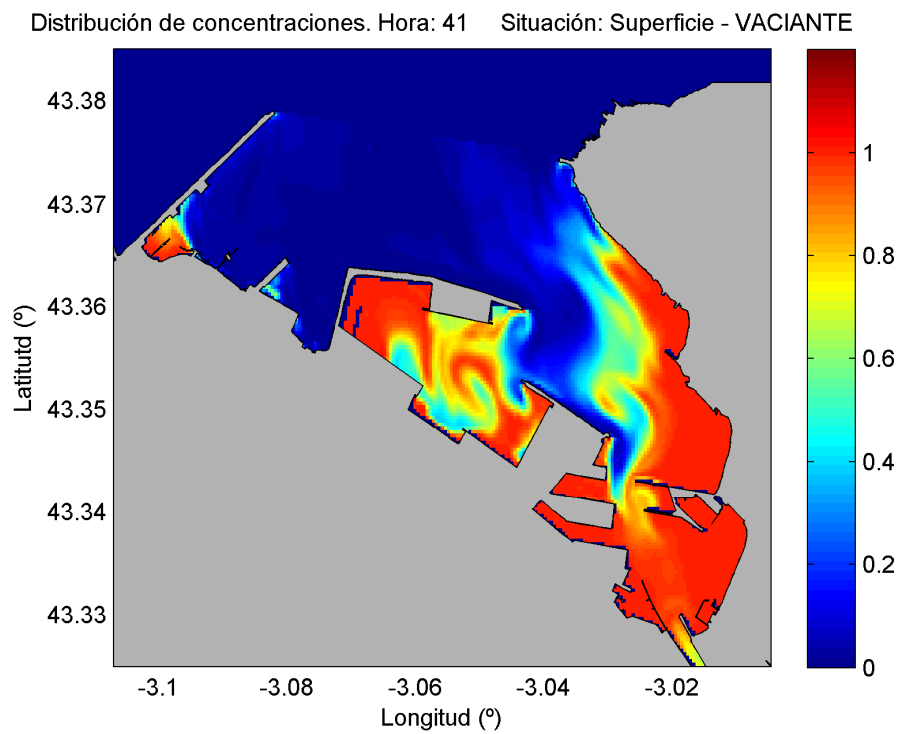


Figura 1.3: Distribución espacial de la concentración en la superficie en la hora 41. Fase de marea vaciante asociada al inicio de la simulación.

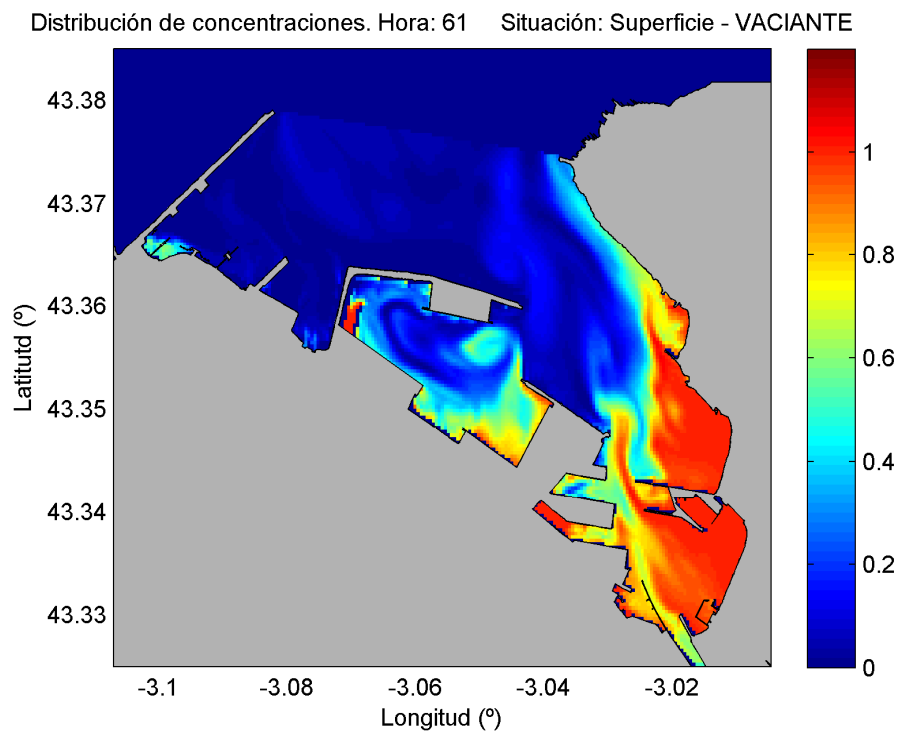


Figura 1.4: Distribución espacial de la concentración en la superficie en la hora 61. Fase de marea vaciante asociada al inicio de la simulación.

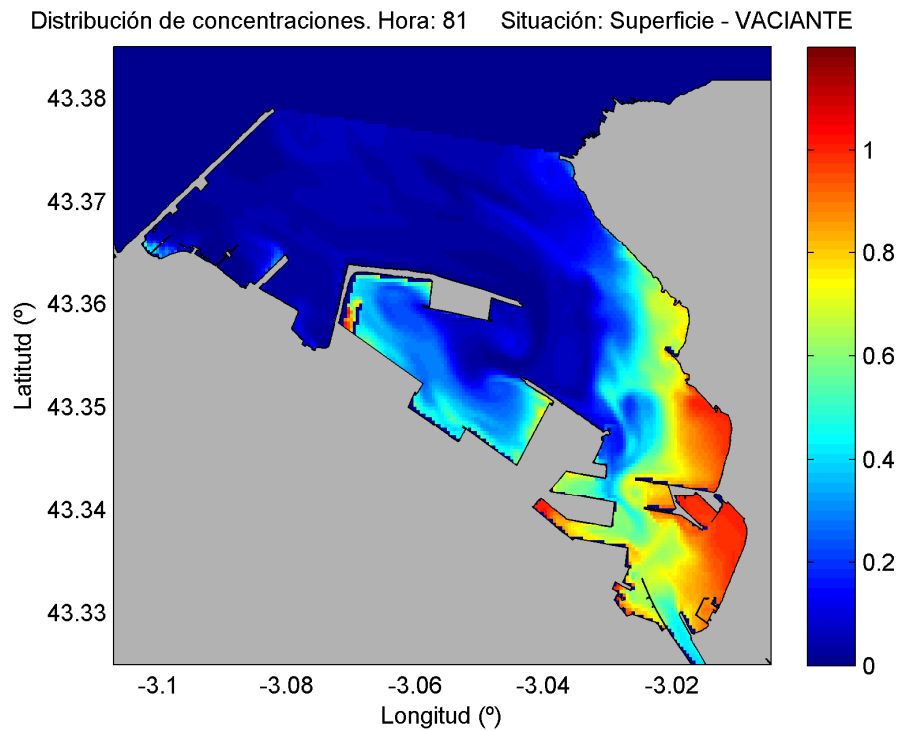


Figura 1.5: Distribución espacial de la concentración en la superficie en la hora 81. Fase de marea vaciante asociada al inicio de la simulación.

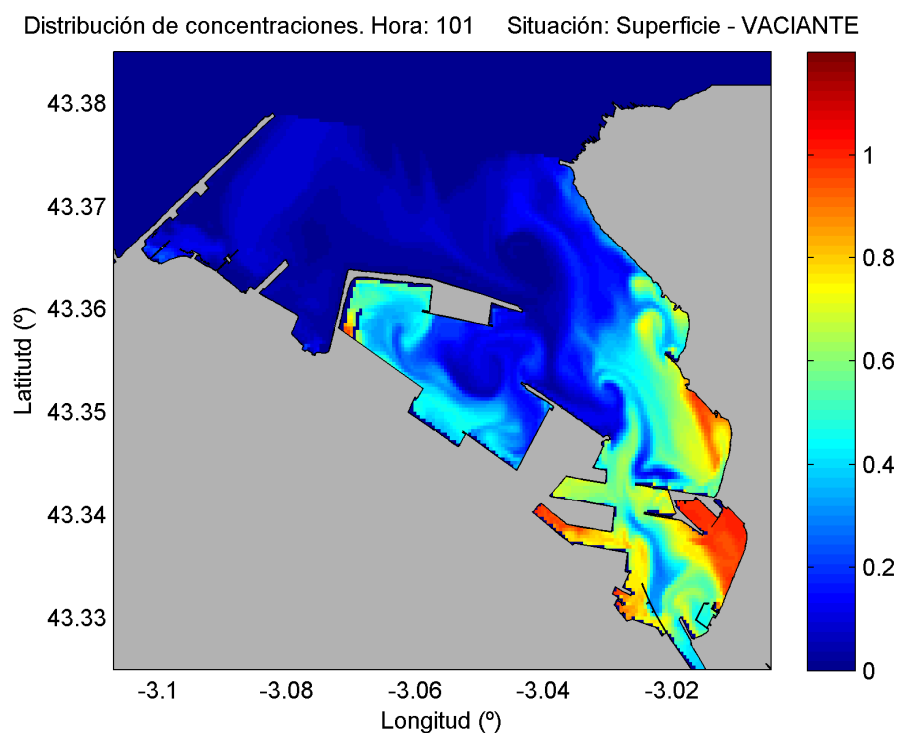


Figura 1.6: Distribución espacial de la concentración en la superficie en la hora 101. Fase de marea vaciante asociada al inicio de la simulación.

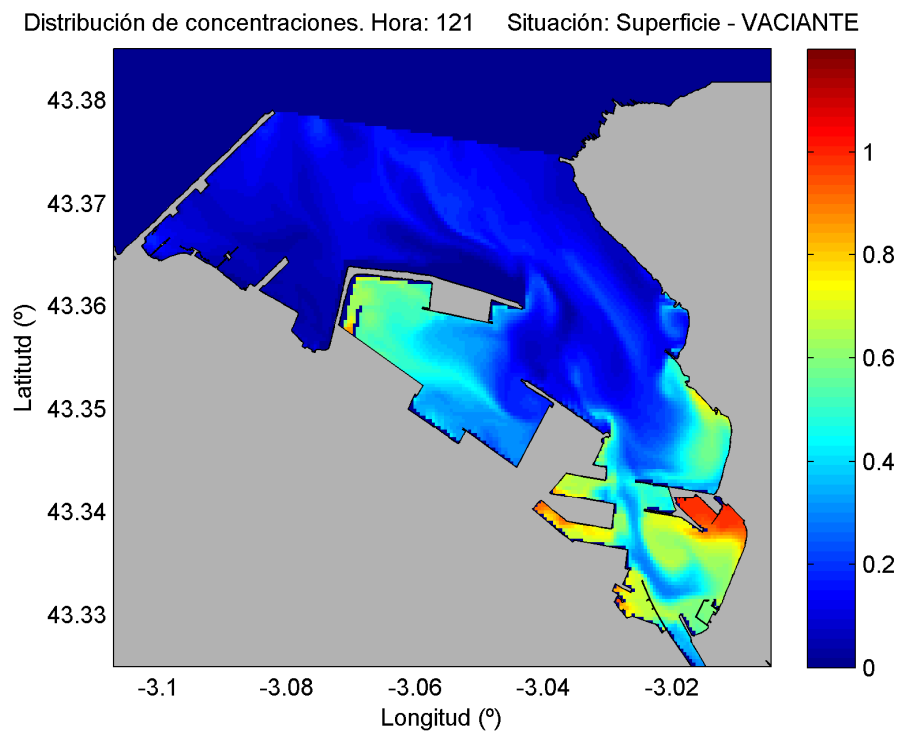


Figura 1.7: Distribución espacial de la concentración en la superficie en la hora 121. Fase de marea vaciante asociada al inicio de la simulación.

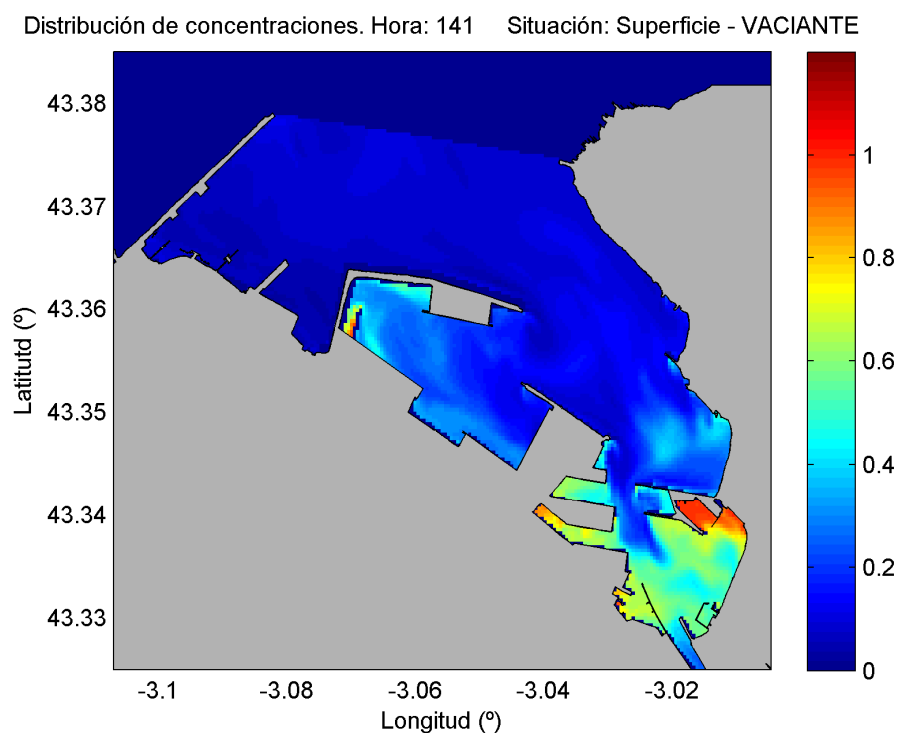


Figura 1.8: Distribución espacial de la concentración en la superficie en la hora 141. Fase de marea vaciante asociada al inicio de la simulación.

ANEJO 4

Coeficientes de variabilidad

ÍNDICE

FIGURA 1.1: COEFICIENTES DE VARIABILIDAD DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA EULERIANOS Y LAGRANGIANOS, EN FONDO Y SUPERFICIE, DE LAS DIFERENTES FASES DE MAREA REGLADOS BAJO LA ESCALA [0 - 1.4]	1
---	---

1 COEFICIENTES DE VARIABILIDAD REGLADOS

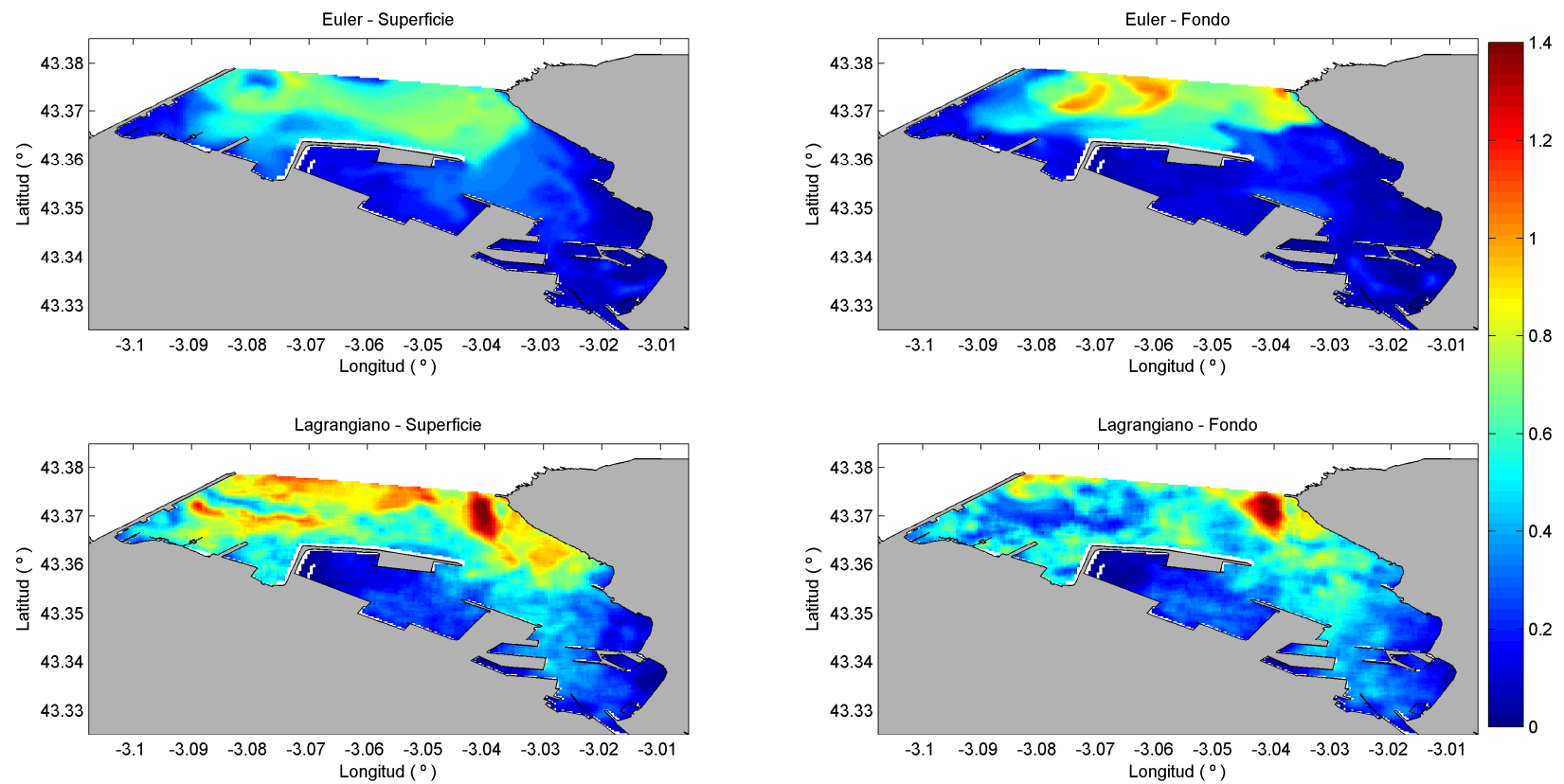


Figura 1.1: Coeficientes de variabilidad de los tiempos de residencia eulerianos y lagrangianos, en fondo y superficie, de las diferentes fases de marea reglados bajo la escala [0 - 1.4]